

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ  
КАФЕДРА КОНСТРУЮВАННЯ ВЕРСТАТІВ ТА МАШИН

«На правах рукопису»

УДК 62-526

До захисту допущено

В.о. Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ О.В. Шевченко

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 р.

**Магістерська дисертація**  
на здобуття ступеня магістра  
зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування

на тему **Створення і дослідження характеристик 3D-принтера на базі триглайда** \_\_\_\_\_

Виконав: студент

\_\_\_\_\_ групи МВ – 71мн

\_\_\_\_\_ Солнцев Олексій Васильович

\_\_\_\_\_ (прізвище ім'я по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Науковий керівник

\_\_\_\_\_ д.т.н., проф. Кузнецов Ю.М.

\_\_\_\_\_ (вчена ступінь та звання, прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент:

\_\_\_\_\_ д.т.н., проф. Герра Ж.А. Хамуйела

\_\_\_\_\_ (посада, наукова ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ (підпис)

Київ - 2019

**Національний технічний університет України**  
**“Київський політехнічний інститут**  
**ім. Ігоря Сікорського”**  
**Механіко-машинобудівний інститут**  
**Кафедра конструювання верстатів та машин**

Рівень вищої освіти другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

Спеціалізація «Металорізальні верстати та системи»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

В.о. Завідувач кафедри

О.В. Шевченко

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“     ”     2019 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ**

Солнцеву Олексію Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Створення і дослідження характеристик 3D-принтера на базі триглайда

науковий керівник дисертації д.т.н., проф. Кузнєцов Ю.М.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від “     ”     20\_\_р. №    

2. Термін подання студентом дисертації    

3. Об'єкт дослідження: характеристики і процеси 3D-принтера на базі триглайда.

4. Предмет дослідження: 3D-принтер на базі триглайда

5. Перелік завдань, які потрібно розробити панетний пошук та аналіз раніше відомих технічних рішень по створенню 3D принтерів з МПС. Синтез конструкції з використанням системних методів пошуку технічних рішень. Виготовлення дослідного зразка. Реалізації системи керування та апробація алгоритмів автокалібрування. Створення динамічних моделей всієї системи та окремих модулів. Створення параметричної математичної моделі для

автоматизованої                      оптимізації                      структури                      3D-принтера.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу Складальне креслення 3D принтера. Плакати: Покрокова схема виготовлення деталей за допомогою адитивних технологій; Морфологічний аналіз та агрегатно-модульний принцип для синтезу 3D-принтера на основі триглайду; Кінематичний аналіз; Розробка та апробація алгоритмів автокалібрування; Розробка методів забезпечення точності у ТОПК з модулем паралельних штанг з сферичними шарнірами; Експериментальні дослідження міцнісних характеристик пластику для FDM – друку; Особливості детального моделювання роботизованих систем для динамічного аналізу та оптимізації; Приклади оптимізації; MATLAB/Simulink для налаштування системи керування (СК) роботом за допомогою ко-симуляції (co-simulation) з ADAMS/View-Flex

7. Орієнтовний перелік публікацій 14 публікацій тез, доповідей та статей (див. Додаток С)

8. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Патентний та інформаційний пошук	3-й кв. 2017 р.	
2	Морфологічний синтез 3D-принтера на базі триглайда	4-й кв. 2017 р.	
3	Виготовлення прототипу та його модулів	1-2-й кв. 2018 р.	
4	Рішення прямої та оберненої задач кінематики	3-й кв. 2018 р.	
5	Налаштування системи керування	4-й кв. 2018 р.	
6	Розробка та апробація алгоритмів автокалібрування	Січень 2019 р.	
7	Параметричний синтез математичної моделі	Лютий 2019 р.	
8	Розробка методів оптимізації структур	Березень 2019 р.	
	Динамічний та частотний аналіз	Квітень 2019 р.	
	Оформлення пояснювальної записки, креслень та плакатів	2-й кв. 2019 р.	

Студент \_\_\_\_\_ **Солнцев О.В.**  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

Науковий керівник дисертації д.т.н., проф. Кузнецов Ю.М.

## АНОТАЦІЯ

### **Солнцев О.В. Створення і дослідження характеристик 3D-принтера на базі триглайда. – Рукопис.**

Магістерська дисертація з напряму підготовки – галузеве машинобудування. - Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, 2019.

Дана магістерська дисертація присвячена створенню та дослідженню верстата на основі 3D-принтера для трьохвимірного вирощування деталей для умов дрібносерійного виробництва та застосування верстата в учбовому процесі кафедри КВіМ КПІ ім. Ігоря Сікорського.

В проекті наведений аналіз технічних рішень, що застосовуються в світовій практиці для створення верстатів, в яких використовується принцип построчкового та пошарового формоутворення поверхонь деталей складної геометрії як з площинними поверхнями так і поверхнями криволінійними.

На підставі цього, обрана компоновка верстата на основі триглайду та обрані форми та розміри деталей (модулів, складових) із застосуванням багаторівневого морфологічного аналізу.

Розроблений робочий проект верстата, виготовлені модулі та їх складові, та здійснено пуско-налагоджувальні роботи. Проведені експериментальні дослідження 3D-принтера на основі триглайду підтвердили теоретичні висновки і довели його працездатність і доцільність використання у виробництві і навчальному процесі. Встановлені математичні залежності розрахунку позиціонування робочого органу для комп'ютерного керування 3D-принтером на основі триглайду. В процесі проектування верстата, розроблені методи підвищення точності позиціонування робочого органу з використанням автокалібрування та алгоритму Бройдена - Флетчера - Гольдфарба – Шанно.

Запропоновані способи регульованого усунення зазорів в рухомих з'єднаннях верстата.

Здійснені дослідження міцнісних характеристик матеріалу для 3D – друку з метою застосування обраних результатів для прогнозування технологічного процесу.

**Ключові слова:** 3D-принтер, триглайд, механізми паралельної структури, автокалібрування, системно-морфологічний синтез, параметризація, алгоритми оптимізації, динамічний аналіз, АЧХ, ADAMS, MBS.

## АННОТАЦИЯ

### **Солнцев А.В. Создание и исследование характеристик 3D-принтера на базе триглайда. -Рукопись.**

Магистерская диссертация по направлению подготовки - отраслевое машиностроение. - Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", Киев, 2019.

Данная магистерская диссертация посвящена созданию и исследования станка на основе 3D-принтера для трехмерного выращивания деталей для условий мелкосерийного производства и применения станка в учебном процессе кафедры КСиМ КПИ им. Игоря Сикорского.

В проекте приведен анализ технических решений, применяемых в мировой практике для создания станков, в которых используется принцип построчного и послойного формообразования поверхностей деталей сложной геометрии как с плоскостными поверхностями так и поверхностями криволинейными.

На основании этого, выбранная компоновка станка на основе триглайда и выбраны формы и размеры деталей (модулей, составляющих) с применением многоуровневого морфологического анализа.

Разработан рабочий проект станка, изготовленные модули и их составляющие, и осуществлено пуско-наладочные работы. Проведенные экспериментальные исследования 3D-принтера на основе триглайда подтвердили теоретические выводы и доказали его работоспособность и целесообразность использования в производстве и учебном процессе. Установлены математические зависимости расчета позиционирования рабочего органа для компьютерного управления 3D-принтером на основе триглайда. В процессе проектирования станка, разработаны методы повышения точности позиционирования рабочего органа с использованием автокалибровки и алгоритма Бройдена - Флетчера - Гольдфарба - Шанно.

Предложенные способы регулируемого устранения зазоров в подвижных соединениях станка.

Проделаны исследования прочностных характеристик материала для 3D- печати с целью применения выбранных результатов для прогнозирования технологического процесса.

**Ключевые слова:** 3D-принтер, триглайд, механизмы параллельной структуры, автокалибровка, системно-морфологический синтез, параметризация, алгоритмы оптимизации, динамический анализ, АЧХ, ADAMS, MBS.

## SUMMARY

### **Solntsev O. V. Design and research the characteristics of a 3D printer based on triglayd. - Manuscript.**

Master's thesis for receiving a level of the bachelor in the direction of preparation - mechanical engineering. - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2019.

This Master's thesis is devoted to creation and machine researches based on the 3D-printer for three-dimensional cultivation of details for conditions of small-scale production and use of the machine in educational process of the Department of Designing of machines and machines carries.

The analysis of the technical solutions applied in world practice of machine's creation in which the principle of a line-by-line and layerwise shaping of surfaces of details of difficult geometry as with planar surfaces, and surfaces the curvilinear is used is provided in the project.

Based on this, configuration of the machine based on a triglayd is selected and forms and the sizes of details (modules, components) using the multi-level morphological analysis are selected.

The detail design of the machine is developed, modules and their components are manufactured and it is realized balancing and commissioning. The conducted pilot studies of the 3D-printer based on a triglayd confirmed theoretical outputs and finished its operability and feasibility of use in production and educational process. Mathematical dependences of calculation of positioning of a working organ for computer control of the 3D-printer based on a triglayd are set. In design process of the machine, methods of increase in positioning accuracy of a working organ with use of autocalibration and Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno algorithm are developed.

There were offered methods of adjustable elimination of gaps in movable connections of the machine. There were conducted researches of strengthening characteristics of material for 3D-print, for the purpose of use of the selected results for prediction of technological process.

**Keywords:** 3D-printer, triglayd, mechanisms of parallel structure, autocalibration, system and morphological synthesis, parametrization, optimization algorithm, dynamical analysis, frequency response, ADAMS, MBS Analysis.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ВИКЛИКИ ЧЕТВЕРТОЇ ПРОМИСЛОВОЇ РЕВОЛЮЦІЇ «ІНДУСТРІЯ 4.0» І СУТЬ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ .....	14
1.1. Світові тенденції і перспективи розвитку сучасного машинобудування - серцевини-верстатобудування .....	14
1.2. Основні поняття та визначення, що стосуються технологічного обладнання з механізмами паралельної структури (МПС) .....	21
1.3. Аналіз відомих схем і конструкцій 3D-принтерів .....	27
1.3.2. Аналіз конструкції та життєвих циклів різних компонок 3D-принтерів .....	31
1.4. Мета і задачі досліджень .....	37
РОЗДІЛ 2. СТВОРЕННЯ ДОСЛІДНОГО ЗРАЗКА 3D-ПРИНТЕРА .....	42
2.1. Морфологічний синтез 3D-принтера та вибір кращого варіанту компоновки з використанням методу розташування пріоритету (парних порівнянь).....	42
2.1.1. Синтез оптимальної каркасної несучої системи за методикою Кузнєцова Ю.М. та Степаненко О.О.....	44
2.1.2. Вибір механічного перетворювача та загальний синтез 3D-принтера....	56
2.2. Агрегатно модульний принцип.....	61
2.3. Вибір та налаштування системи керування .....	67
2.3.1. Теоретичні аспекти числового програмного керування .....	67
2.3.2 Вибір модулів для числового програмного керування 3D-- принтером..	70
2.3.3 Порівняльний аналіз логіки програмування (формування G-коду) металорізальних верстатів та 3D-принтерів.....	73
РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТВОРЕНОГО 3D-ПРИНТЕРА .....	79
3.1. Структурно-кінематичний аналіз 3D-принтеру на базі триглайду.....	79
3.1.1 Структурний аналіз і синтез працездатних рішень .....	80
3.1.2. Вирішення прямої задачі кінематики графо-аналітичним методом.....	83
3.1.3. Використання САПР MATHCAD для аналізу 3D-принтера на основі триглайду. ....	91
3.2. Аналіз похибок позиціонування та розробка методів їх усунення.....	93

3.2.1. Розробка та апробація алгоритмів для автокалібрування 3D-принтера на основі триглайду .....	93
3.3. Динамічний аналіз .....	99
3.3.1. Деякі особливості динамічного моделювання у САПР Autodesk Inventor .....	99
3.3.2. Моделювання динамічних процесів в ADAMS .....	105
3.3.3 Побудова моделі для вібро та модального аналізу .....	109
3.4. Висновки .....	113
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ 3D-ПРИНТЕРА .....	114
4.1. Розробка методів та аналіз підвищення жорсткості 3D-принтера на основі триглайду за рахунок створення регульованого натягу в рухомих з'єднаннях .....	114
4.2. Аналіз матеріалів для FDM друку та дослідження їх міцнісних характеристик .....	121
4.2.1. Огляд матеріалів, що використовуються для FDM друку .....	121
4.2.2. Випробування зразків пластику для FDM друку на розтяг та розрахунок характеристик .....	124
РОЗДІЛ 5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ. РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ПО ВІДРОДЖЕННЮ У ВИРОБНИЦТВО І НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС .....	131
5.1. Постановка лабораторної роботи з дисципліні «Технологічне обладнання з паралельною кінематикою» і методика проведення .....	131
5.2. Вартісна оцінка виготовлення дослідного зразка 3D-принтера .....	132
5.3. Представлення фрагментів роботи на промисловій виставці у м. Ганновері (Німеччина) .....	135
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	136
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	138

## ВСТУП

**Актуальність теми.** На сьогоднішній день налагодження будь-якого виробництва потребує нових підходів, врахування додаткових факторів при виборі обладнання та технологій. Так, крім звичних показників продуктивності, якості та безпеки всесвітньо враховуються додаткові вимоги до оптимізації виробництва з точки зору енергоефективності та екологічності. Такі положення можна втілити тільки за рахунок пошуку нових рішень [4,7,8]. Зокрема саме розвиток технологічного обладнання з МПС є одним з шляхів реалізації сучасних підходів.

Таким чином, дана робота покликана висвітлити підходи та процеси проектування обладнання з врахуванням сучасних вимог на прикладі налагодження дрібносерійного виробництва деталей з пластичних матеріалів з використанням адитивних технологій, тобто формоутворення виробів шляхом пошарового нанесення розплавленого PLA – пластику за визначеними траєкторіями руху робочих органів (РО), визначеними в програмі керування верстатом, та забезпечення зняття мінімального припуску ріжучим інструментом із поверхонь сформованої заготовки.

Вирішення наведених задач можливе за рахунок створення малогабаритного Технологічного обладнання (ТО) із застосуванням принципів, які ґрунтуються на: зменшенні металоємності шляхом використання каркасних конструкцій несучих систем; підвищенні швидкості переміщення ВО за рахунок використання МПС в конструкціях верстатів; застосуванні модульного принципу, який дозволяє зменшити час та витрати на проектування, складання і переналагодження.

Однак, відсутня теорія створення малогабаритного ТО на основі зазначених принципів. З цієї причини виникає необхідність в проведенні досліджень, направлених на аналіз та синтез структур, схем і конструкцій ТО з обґрунтуванням їх раціональних параметрів, що дозволить створювати вітчизняні конкурентоспроможні моделі малогабаритного ТО, в тому числі і 3D-принтерів, як вид верстатів для адитивного виробництва. Тому, даний напрямок досліджень є актуальним і необхідним для розвитку верстатобудування в Україні.



Крім того даний дипломний проект є невід'ємною частиною Науково-дослідної роботи № 0116U006641 від 04.07.2016 р. "Розробка технічної системи «Біонічний маніпулятор» і дослідження її кінематики для відновлення функцій людських пальців".[20,21,22,23]

В процесі роботи над створенням ТС «Біонічний маніпулятор» та розробки 3D-принтера на основі триглайду у співавторстві було опубліковано 9 тез доповідей у збірниках всеукраїнських та міжнародних конференцій. Студенти-співучасники проекту виступали з Доповідями на декількох конференціях в КПІ ім. Ігоря Сікорського, а також висвітлювали результати роботи у інших містах України.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є підвищення техніко-економічних показників малогабаритного Технологічного обладнання, зокрема FDM 3D-принтерів з комп'ютерним керуванням за рахунок синтезу нових конструкцій на основі каркасних несучих систем, використанні МПС і модульного принципу з обґрунтуванням їх раціональних параметрів, автоматизованого налагодження точності переміщень РО малогабаритного обладнання. А також створення науково-навчальної бази, для можливості запровадження результатів цієї роботи у навчальний процес.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні задачі:

1. Виконати аналіз відомих конструкцій 3D-принтерів, їх кінематичних схем, типів, а також методів синтезу нових конструкцій.
2. Сформулювати критерії вибору раціональних компоновань малогабаритного ТО на рівнях синтезу структур, схем і конструкцій.
3. З використанням багаторівневого морфологічного підходу синтезувати нові конструкції малогабаритних верстатів на основі обмеженої кількості модулів із застосуванням концепції каркасних несучих систем, МПС і модульного принципу.
4. Встановити математичні залежності розрахунку позиціонування ВО для комп'ютерного керування верстатами з МПС каркасної будови.

5. Розробити методику, конструкції та програмне забезпечення для автоматизованого калібрування та підвищення точності ТО з МПС.

6. Розробити прилади для підвищення жорсткості модуля паралельних штанг в ТО з МПС.

7. Провести дослідження щодо можливості використання друкованих модулів, у несучих системах різних механізмів.

8. Теоретично дослідити, та експериментально підтвердити працездатність і ефективність синтезованих конструкцій верстатів, встановивши залежності технологічних і конструктивних параметрів від геометрії компоновки та видів навантажень.

9. Розробити параметричну модель в ADAMS для здійснення автоматизованого пошуку найкращих конструкторських рішень

Розробити рекомендації по практичному впровадженню результатів досліджень і нових малогабаритних верстатів з комп'ютерним керуванням у виробництво і навчальний процес.

**Об'єкт дослідження** – характеристики і процеси 3D-принтера на базі триглайда.

**Предмет дослідження** – 3D-принтер на базі триглайда.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження проведені на основі фундаментальних засад конструювання верстатів та машин, технології машинобудування, теорії механізмів і машин, теоретичної механіки, мехатроніки, та методології науково-технічної творчості. Синтез нових конструкцій верстатів здійснено із застосуванням методу багаторівневого морфологічного синтезу і аналізу. Комп'ютерне проектування та попередній динамічний аналіз здійснювалися у CAD Autodesk Inventor. Для перевірки розрахованих кінематичних моделей використовувався пакет MathCAD. Контроль та система керування здійснювалася за допомогою Arduino. Програма для візуалізації поля похибок написана у Python з використанням бібліотек Matplotlib. Параметризована модель була

побудована в середовищі ADAMS. Вібро та модальний аналіз здійснювався за допомогою плагіна Vibration Adams.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

В роботі отримала подальший розвиток концепція створення каркасних компонувань 3D-принтерів, зокрема з МПС на штангах постійної довжини, стосовно малогабаритних верстатів на модульному принципі.

1. Вперше було створено параметричну модель 3D-принтера на базі триглайду для автоматизованої оптимізації різними алгоритмами задля досягнення поставлених задач у відповідних умовах виробництва
2. Було розроблено концепцію ко-симуляції (cosimulation) для створення системи керування з урахуванням підатливості рухомих вузлів системи
3. Розроблено алгоритми автокалібрування для підвищення точності верстатів на базі триглайду. Експериментально підтверджено доцільність використання таких алгоритмів.
4. Розроблені детальні математичні моделі роботів на базі триглайду.
5. Проведені дослідження міцнісних характеристик зразків надрукованих деталей з різних матеріалів та з різними режимами друку.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

1. На основі даної магістерської дисертації було розроблено серію лабораторних робіт з курсу «Машини і механізми с МПС».
2. Впроваджений алгоритм автокалібрування був висвітлений на відповідних форумах та отримав позитивні відгуки від користувачів мережі, що займаються 3D-друком.
3. Відео – презентація проекту по створенню 3D-принтера була продемонстрована на Ганноверській виставці 2018 та стала яскравим прикладом роботи Київської школи політехніків на міжнародній арені.
4. Розроблена параметрична модель може бути використана для оптимізації роботів-верстатів на модульному принципі відповідно до умов виробництва.

**Особистий внесок здобувача.** Проведено системно-морфологічний багаторівневий синтез структури та конструкції 3D-принтера, здійснено теоретичні дослідження і розрахунки отриманих варіантів; спроектовано і виготовлено діючий прототип; розроблено і виготовлено контролер системи керування принтером; встановлено математичні залежності для керування принтером з МПС на штангах постійної довжини; розроблено алгоритми автокалібрування 3D-принтера; створено повністю параметричну модель для динамічного та кінематичного аналізу 3D-принтера на основі триглайду. Отримана АЧХ принтера для робочих частот. Показані приклади автоматичної оптимізації робота до умов виробництва.

Постановка мети досліджень, формування основних положень роботи, опрацювання структури та змісту дослідження виконані разом з науковим керівником.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати досліджень, які викладені в дисертації, були представлені і обговорені на 4-и наукових конференціях, в тому числі на промисловій ярмарці у місті Ганновер 2018.

1. Innovations in Science and Technology : the XVII All-Ukrainian R&D Students Conference Proceeding, (Kyiv, November 22, 2016)
2. Міжнародна наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 17–18 листоп. 2016.)
3. Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню», секція "Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка". (Київ: НТУУ "КПІ", 2016 )
4. Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів "ІННОВАЦІЇ МОЛОДІ - МАШИНОБУДУВАННЮ" (Київ: НТУУ "КПІ", 2016.)
5. Hannover Messe 2018. Ганноверська промислова ярмарка 2018 (Ганновер, 20-24 квітня. 2018)

**Публікації.** За результатами дисертації опубліковано 12 наукових праць

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, 5-и розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (41 найменувань). Робота викладена на 139 сторінках машинописного тексту, містить 40 рисунків, 16 таблиць та 3 додатки.

## **РОЗДІЛ 1. ВИКЛИКИ ЧЕТВЕРТОЇ ПРОМИСЛОВОЇ РЕВОЛЮЦІЇ «ІНДУСТРІЯ 4.0» І СУТЬ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

### **1.1. Світові тенденції і перспективи розвитку сучасного машинобудування - серцевини-верстатобудування**

Основна риса сучасності – це орієнтація виробництва на ринок, що неможливо без інтеграції науки, освіти, виробництва і сфери обслуговування, а також досягнення наступних основних цілей [9]:

1. Підвищення продуктивності.
2. Підвищення якості продукції.
3. Скорочення витрат на виробництво при заощадженні енергоматеріальних ресурсів.
4. Поліпшення або зниження долі фізичної праці людини.
5. Полегшення або скорочення монотонної інтелектуальної (розумової) праці людини.
6. Розширення технологічних і функціональних можливостей обладнання.

Досягнення наступних цілей позначилося на світових тенденціях розвитку машинобудування і, зокрема, його серцевини – верстатобудування, основними з яких є наступні [9,13,18,19,20]:

1. Високошвидкісна (High Speed Cutting) та високопродуктивна (High Production Cutting) обробка: швидкості лезвійної  $v \leq 30$  м/с ; алмазно-абразивна  $v \leq 150$  м/с; швидкості лінійних переміщень до 60...200м/хв., а прискорення 0,5g...5g; автоматична зміна інструментів  $\leq 2...5$  с та столів-супутників  $\leq 5...8$ с.
2. Високопрецизійна (High Precision Cutting) обробка з точністю обробки до 0.01 мкм та шероховатістю поверхні  $R_z=0.001$  мкм (1 нанометр) .
3. Широке використання енерго- та матеріалозберігаючих технологій.

4. Створення багатофункціонального, багатоцільового обладнання, в тому числі з паралельною кінематикою з мехатронними компонентами, які об'єднують засоби механіки, електроніки та електротехніки..

5. Агрегатно-модульний принцип конструювання, виготовлення і складання виробів з реалізацією принципу паралельного проектування (Concurrent Engineering) в короткі терміни з одночасною підготовкою виробництва (синхронізація).

6. Впровадження гнучких виробничих систем, модульних і інтегрованих технологій з використанням 3D— моделювання і лазерної техніки типу Rapid Prototyping.

7. Застосування сучасних евристичних і комп'ютерних методів пошуку нових і нетрадиційних технічних рішень, що відповідає умовам інноваційної економіки (на зміну економіці речей приходить економіка знань).

8. Застосування нових прогресивних матеріалів: для нерухомих базових деталей – це так званий верстатометал і синтегран, полімербетон, литво з гранітної крошки і екологічно чистими зв'язуючими матеріалами; для рухомих деталей і несучої системи – алюмінієво-магнієві сплави, які леговані нікелем і скандієм: для шпинделів, ходових гвинтів та інш. – економно леговані сталі.

9. Сервісна і технічна підтримка через інтернет-споживачів обладнання, глибока діагностика кожної одиниці обладнання і одиниць з ЧПК.

Досягнення вищевикладених цілей неможливо без змін та нових підходів до підготовки інженерної еліти України – випускників Вищих навчальних закладів. Саме тому професором каф. КВМ КПІ ім. Ігоря Сікорського, доктором технічних наук, науковим керівником цієї магістерської дисертації Кузнєцовим Ю.М. пропонується наступне.

Серед освітніх засобів в технічних ВНЗ повинні використовуватися: 1) спеціальне навчальне обладнання з комп'ютерним управлінням (настільні верстати,

роботи, транспортні засоби, верстатні системи, 3D-принтери і т.п.[14]; 2) інформаційні технології у вигляді 3D-модулів технологічного, допоміжного обладнання їх вузлів і механізмів; 3) віртуальні технології (комп'ютерні імітатори, тренажери, анімаційні ролики за технологічними процесами і верстатів з ЧПК і т.п.); 4) відеоролики з різних вітчизняних і міжнародних ярмарків, виставок, тощо

Серед інформаційних технологій в складі освітніх засобів доцільно використовувати: універсальну систему тестування знань; системи підготовки та технологічного діагностування керуючих програм і параметрів пристроїв ЧПК; системи калібрування верстата з УПУ; системи моніторингу та діагностики інтелектуальних вузлів; комплекти 3D-моделей і САПР ріжучого інструменту, 3D-моделей і САПР вузлів і механізмів верстатів та іншого технологічного і допоміжного обладнання.

У технічних вищих навчальних закладах за зразком навчально-дослідних лабораторій зарубіжних фірм FESTO, SIEMENS, DELCAM і ін. [22, 23] за участю вітчизняних вчених, аспірантів, докторантів і підготовлених випускників середніх навчальних закладів, в студентських конструкторсько-технологічних бюро і гуртках створювати власні навчально-дослідні лабораторії за прикладом кафедри конструювання верстатів та машин КПІ ім. Ігоря Сікорського з настільним технологічним обладнанням нових поколінь з комп'ютерним управлінням, наприклад, верстатів, машин, роботів з механізмами паралельної структури (МПС) (рис. 1.1) [14,15-17,19].



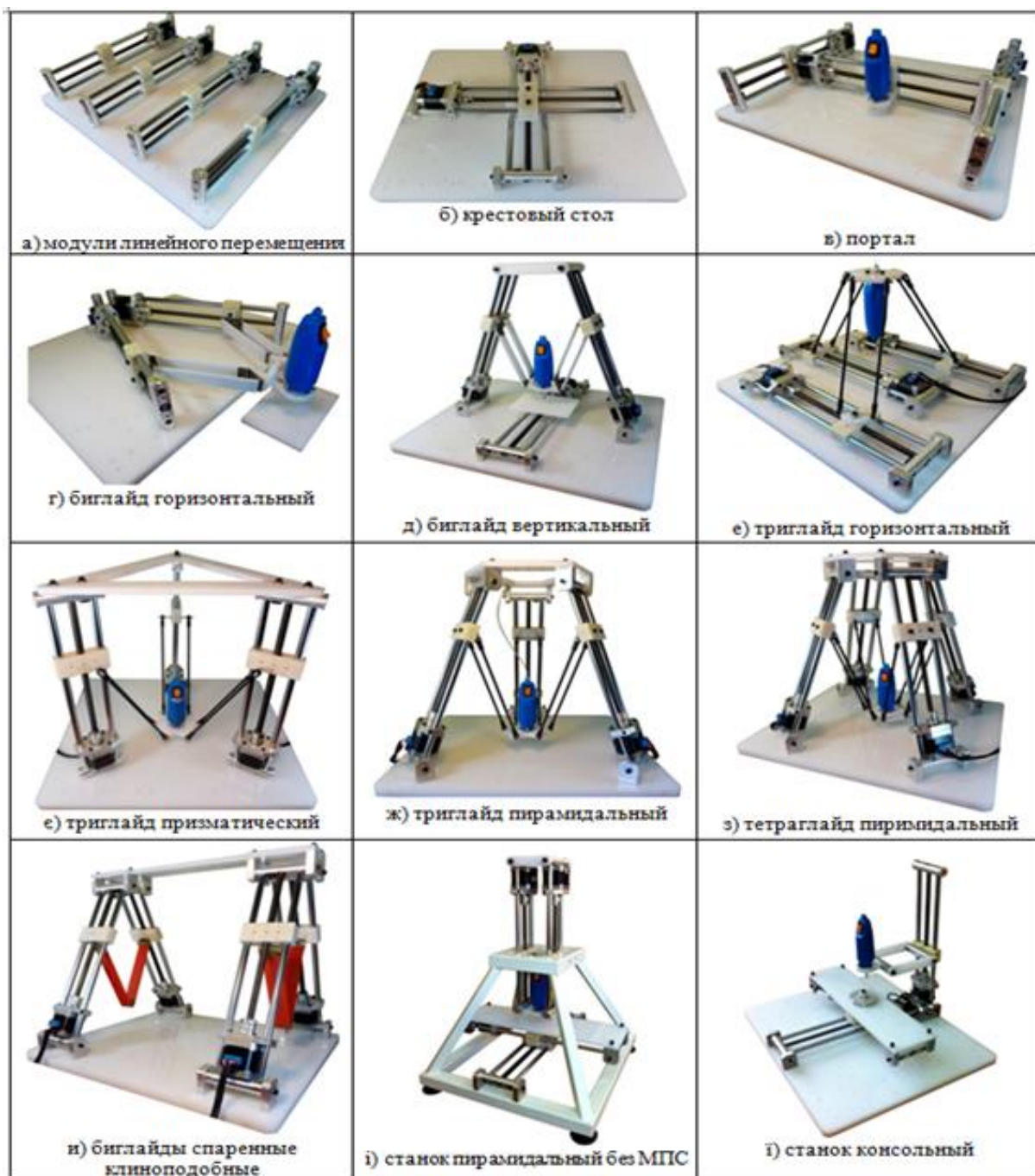


Рис. 1.1. Запропонований мінімальний набір настільних верстатів з комп'ютерним управлінням каркасного компоунвання на базі універсального модуля лінійних переміщень

При певному наборі виконавчих (робочих) органів [14] можна компоувати настільне технологічне і допоміжне обладнання різного призначення відповідно до конкретної машинобудівної спеціальності, в тому числі з МПС (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Умовне позначення виконавчих (робочих) органів, розташованих на рухомій платформі технологічного обладнання з МПС

Найменування	Позначення	Найменування	Позначення
Мотор-шпиндель		Плазмотрон	
Мотор-шпиндель самодіючий з керованою координатою		Лазерна головка	
Інструмент, що не обертається (різець)		Різак (гідрострійний, газосварний)	
Інструментальна, багатопозиційна револьверна головка		Сварочна проволочка (електрод), звернутий в бухту	
Вимірюючий щуп		3D-принтер з пластичним матеріалом (Filament), звернутий в бухту	

У набір доцільно включати 3D-принтери (рис. 1.2), побудовані з використанням тих же модулів лінійних переміщень (рис. 1.1, а) з обґрунтуванням більш ефективного варіанту (рис. 1.2, б), де маса вирощуваного виробу, розташованого на нерухомому столі, не впливає на динамічні показники обладнання в порівнянні з поширеним варіантом (рис. 1.2, а), коли вирощуваний об'єкт знаходиться на рухомому двох-координатному столі.

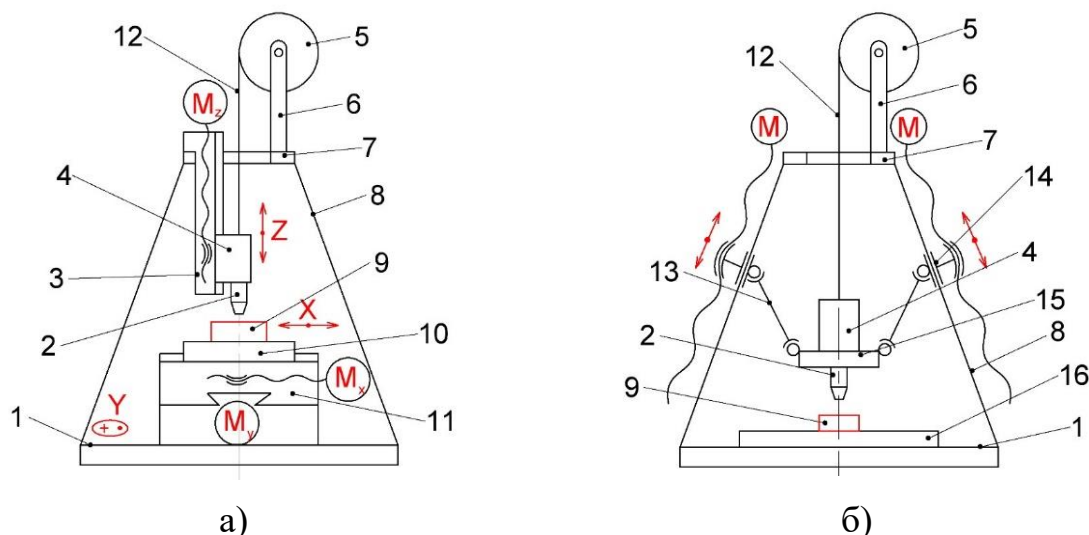


Рис.1.2. Схеми 3D—принтерів на базі настільних верстатів каркасного компонування з традиційними супортами координатних переміщень (а) та МПС типу триглайд (б): 1 – основа; 2 – друкуюча головка; 3, 10, 11 – координатні блоки X, Y, Z; 4 – друкуюча голоїка; 5 – бухта; 6 – стійка; 7 – траверса; 8 – каркас; 9 – об’єкт, що вирощується; 12 – Filament; 13 – штанга постійної довжини; 14 – рухома опора штанги; 15 – рухома платформа; 16 – нерухомий стіл.

Елементна база та система керування верстатом набула чималих змін. В минулому стан технологій не дозволяв створювати доступні малогабаритні верстати з ЧПК, адже, на стан технологій того часу, система керування малогабаритних верстатів коштувала би більше ніж система керування повномасштабного верстата. Однак, за останні роки технології розвинулись до такого рівня, що малогабаритний верстат може зібрати і дозволити собі будь-яка людина, яка цього бажає. Таким чином, за умов наявності і великої розповсюдженості багатьох видів комплектуючих, створення верстатів малих габаритів сьогодні не є проблемою як раніше. Стосовно механічної та електромеханічної частин, на сьогоднішній день їх складові відрізняються наступними характеристиками:

1. Модульність. Всі комплектуючі для створення верстатів побудовані на модульному принципі, стандартизовані, ідеально співрозміщуються між собою.

2. Багатоваріантність. В залежності від потреб, розмірів та функцій верстата, можна обрати будь-який вид, типорозмір та найменування комплектуючого для верстата.
3. Доступність. Всі комплектуючі масово виготовляються багатьма фірмами світу і при необхідності можна знайти саме ті деталі і ті розміри, які потрібні в конкретному випадку.

На рисунку 1.3 зображені приклади комплектуючих для сучасного малогабаритного верстата.

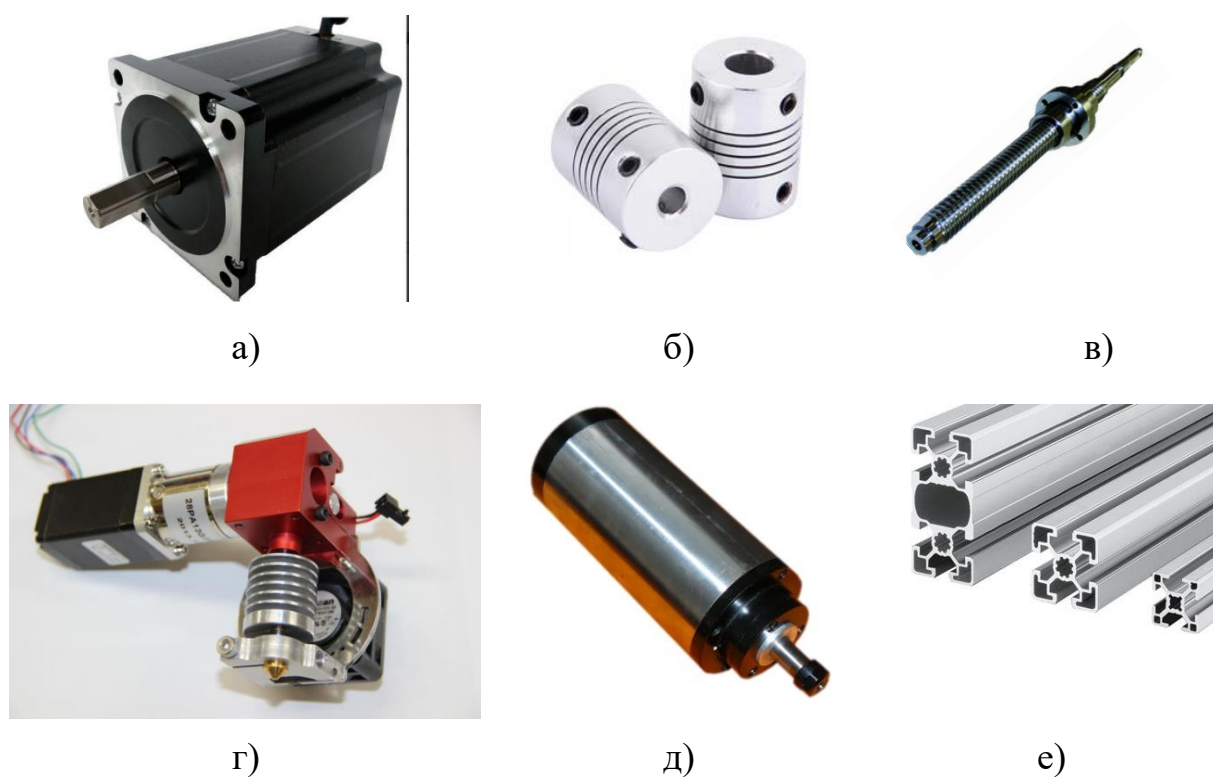


Рис. 1.3. Приклади сучасних комплектуючих для створення малогабаритних верстатів з ЧПК: а – кроковий двигун; б – муфта; в – гвинтова передача; г – модуль екструдера з хотендом; д – мотор-шпиндель; е – алюмінієвий верстатний профіль

## 1.2. Основні поняття та визначення, що стосуються технологічного обладнання з механізмами паралельної структури (МПС)

Усі наведені найменування механізмів, в основному, точно визначають їх кінематичну структуру і специфічні властивості, але з метою удосконалення термінології, слід прийняти більш поширену назву "Механізми паралельної структури" (МПС). Назви "механізми платформного типу", "механізми вищого класу", "механізми з паралельними зв'язками" не можуть бути застосовані для всіх подібних механізмів, так як вони визначають тільки деякі їх індивідуальні властивості [10].

Але, що стосується технологічного обладнання (ТО), побудованого на основі МПС, можна застосувати термін "технологічне обладнання з паралельною кінематикою" або "технологічне обладнання з МПС. МПС відрізняються функціональним призначенням, кінематичною структурою, ступенями вільності, принципом дії і конструктивним виконанням, які діляться на дві групи :

- повнопаралельні - механізми, в яких кількість ( $n$ ) ступенів свободи ( $F$ ) Виконуючого органу (ВО) дорівнює кількості кінематичних ланок ( $m$ ), кожна з яких має індивідуальний привід за допомогою якого ІВ механізму реалізує задані координатні переміщення (рис. 1.4, а). Таким чином, для повнопаралельного механізму кількість ступенів свободи  $n=6$ , кількість кінематичних ланок  $m=6$ , тобто  $n = m$ .

- неповнопаралельні - механізми, в яких кількість ( $n$ ) ступенів свободи ВО більше, ніж кількість кінематичних ланок ( $m$ ), кожна з яких має два і більше індивідуальних приводи переміщень (рис. 1.4, б).

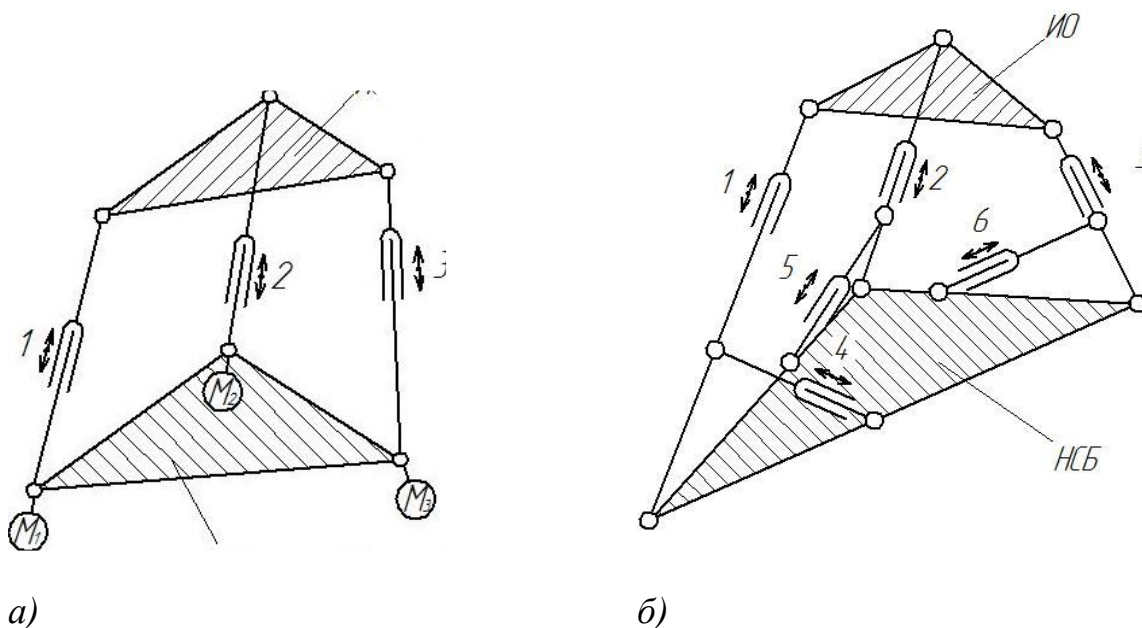


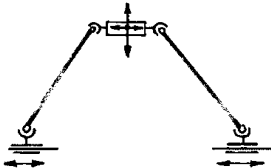
Рис. 1.4 Основні типи МПС а – повнопаралельний механізм трипод  $n=m=3$ , б – неповнопаралельний механізм  $n=6, m=3$

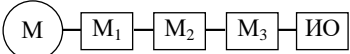
Дослідженням і проектуванням МПС займається значна кількість науково-дослідних центрів світу: виробничі фірми, проектні організації та наукові лабораторії багатьох університетів США, Німеччини, Франції, Італії, Японії, Кореї та інші. Але, як показує аналіз наукових публікацій, інформація щодо єдиної класифікації і термінології в цій галузі відсутня. На кафедрі конструювання верстатів та машин КПІ ім. Ігоря Сікорського разом з КНТУ та ХНТУ триває робота з розвитку теорії проектування, узагальнення та удосконалення термінології, основних положень і систематизації МПС і визначенню їх місця при створенні ТО різного призначення.

У наведеній термінології використана існуюча термінологія з теорії механізмів і машин, теоретичної механіки і деталей машин. Далі наведена таблиця з запропонованою термінологією (табл.1.2) [10,19].

Таблиця 1.2

## Основні поняття та визначення

Термін	Визначення	Схема
1	2	3
Механізм паралельної структури (МПС)	Механізм, в якому ВО шарнірно пов'язаний з нерухомим елементом кінематичними ланцюгами, кожен з яких має індивідуальний привід або накладає певну кількість зв'язків на переміщення ВО	—
Технологічне обладнання з паралельною кінематикою	Технологічне обладнання, побудоване на основі МПС	—
Опорний шарнір	3-рухома кінематична обертальна пара, яка з'єднує нерухомий елемент механізму з кінематическим ланкою	—
Сферичний шарнір	3-рухома кінематична обертальна пара, елементи якої виконані у вигляді сфери	
Універсальний шарнір	Пристосування для передачі обертального руху між штангою і нерухомим елементом механізму, осі якого не лежать на одній прямій і мають відносне переміщення	—
Замкнений кінематичний ланцюг	Кінематична ланцюг, кожна ланка якої пов'язане з двома кінематичними парами і утворює замкнений контур	
Незамкнутий кінематичний ланцюг	Система з'єднань кінематичними парами ланок, які не утворюють замкнений контур	

Паралельне з'єднання механізмів (ланок)	Сукупність механізмів (кінематичних ланок) вхідні і вихідні ланки яких з'єднані	
Послідовне з'єднання механізмів (кінематичних ланок)	Сукупність механізмів (кінематичних ланок), в яких вхідний ланка попереднього механізму пов'язане з вхідним наступного.	
Штанга	Стрижень, який в МПС є основною кінематичною ланкою для передачі руху і зусиль	 <p>Змінної довжини</p> <p>Постійної довжини</p>
Сферический механізм параллельной структуры	Механізм в якому всі постійні і моментальні осі обертання ланок перетинаються в одній точці	—
Метод перетворення координат опорних шарнірів	Визначення положення ланок і ВО механізму паралельної структури шляхом використання залежностей аналітичної геометрії (перенесення початку координат і поворот осей) з урахуванням розмірів ланок, виду і відносного положення елементів кінематичних пар	—

Продовження табл. 1.2



Біпод	Технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання двох штанг змінної довжини	
Біглайд	Технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання двох штанг постійної довжини	
Трипод	Технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання трьох штанг змінної довжини	
Триглайд	Технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання трьох штанг постійної довжини	
Пентапод	Технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання трьох основних і двох додаткових штанг змінної довжини	

Продовження табл. 1.2

Ортоглайд	Технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання трьох штанг постійної довжини з ортогональним розташуванням направляючих	
Гексапод	Технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання шести штанг змінної довжини	
Гексаглайд	Технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання шести штанг постійної довжини	
Дельта	Технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання штанг, які виконані у вигляді паралелограмної механізми, а перетворення руху реалізується примусовим обертанням опорних шарнірів	

Дана магістрська дисертація безпосередньо пов'язана з розробкою 3D-принтеру на основі триглайду, тому слід ввести поняття та визначення зі сфери адитивних технологій [6].

3D-принтерами називають верстати з числовим програмним управлінням (ЧПК), які виконують побудову деталі адитивним способом.

3D-сканер — пристрій, який аналізує об'єкт або середовище реального світу для збору даних щодо його форми і, якщо можливо, кольору. Зібрані дані потім використовуються для побудови цифрових тривимірних моделей.

Для створення пристроїв 3D-сканування може бути використано багато різноманітних технік; кожна технологія має свої особливості, обмеження і вимагає різних витрат. Більшість обмежень стосуються видів об'єктів, які можуть бути оцифровані, які досі не вирішені до кінця. Наприклад, більшість оптичних технологій матиме складнощі з обробкою блискучих, дзеркальних або прозорих об'єктів. Наприклад, промислова комп'ютерна томографія може використовуватись для побудови цифрових 3D-моделей, застосовуючи неруйнівний контроль.

Термін «адитивне виробництво» описує технології зі створення об'єктів за рахунок нанесення послідовних шарів матеріалу. Моделі, виготовлені адитивним методом, можуть застосовуватися на будь-якому виробничому етапі - як для виготовлення дослідних зразків (т.зв. швидке прототипування), так і в якості самих готових виробів (т.зв. швидке виробництво).

У виробництві, особливо машинній обробці, термін «субтрактивні» означає традиційні методи і є ретронімом, визначеним в останні роки для розмежування традиційних способів і нових адитивних методів. Хоча традиційне виробництво використовує по суті «адитивні» методи протягом століть (такі, як склепка, зварювання і привинчування), в них відсутня тривимірна інформаційна технологічна складова. Машинна ж обробка (виробництво деталей точної форми), як правило, ґрунтується на субтрактивних методах - точінні, фрезеруванні, свердлінні, шліфуванні та ін.

Термін «стереолітографія» був визначений Чарльзом Халлом в патенті від 1984 року, як «система генерування тривимірних об'єктів за рахунок пошарового формування».

### **1.3. Аналіз відомих схем і конструкцій 3D-принтерів**

В цьому розділі дипломного проекту будуть висвітлені:

- основні підходи до адитивних технологій у Світі;
- історія створення 3D-принтерів та їх життєві цикли;

- різноманітність компоновок 3D-принтерів за їх кінематикою

### 1.3.1. Загальні принципи 3D-друку

3D-друк або «аддитивне виробництво» - процес створення цілісних тривимірних об'єктів практично будь-якої геометричної форми на основі цифрової моделі. 3D-друк заснований на концепції побудови об'єкта послідовно нанесеними шарами, що відображають контури моделі. Фактично, 3D-друк є повною протилежністю таких традиційних методів механічного виробництва і обробки, як фрезерування або різка, де формування виробу відбувається за рахунок видалення зайвого матеріалу (т.зв. «субтрактивне виробництво»).

3D-принтерами називають верстати з числовим програмним управлінням (ЧПК), які виконують побудову деталі адитивним способом.

Хоча технологія 3D-друку з'явилася ще в 80-х роках минулого століття, широке комерційне поширення 3D-принтери отримали тільки на початку 2010-х. Перший дієздатний 3D-принтер був створений Чарльзом Халлом, одним із засновників корпорації 3D-Systems. На початку 21 століття відбулося значне зростання продажів, що призвело до різкого падіння вартості пристроїв. Згідно з даними консалтингової фірми Wohlers Associates, в 2012 році обсяг світового ринку 3D-принтерів і супутніх сервісів досяг \$ 2,2млрд., Показавши зростання на 29% в порівнянні з 2011 роком.

Технології 3D-друку використовуються для прототипування і розподіленого виробництва в архітектурі, будівництві, промисловому дизайні, автомобільної, аерокосмічної, військово-промислової, інженерної та медичній галузях, біоінженерії (для створення штучних тканин), виробництві модного одягу і взуття, ювелірних виробів, в освіті, географічних інформаційних системах, харчової промисловості та багатьох інших сферах. Згідно з дослідженнями, домашні 3D-принтери з відкритим вихідним кодом дозволяють відіграти капітальні витрати на власне придбання за рахунок економічності побутового виробництва предметів.

На рис. 1.5 показані основні методи адитивних технологій, що сьогодні набули світової популярності.



Рис. 1.5. Методи адитивного виробництва

В даній дипломній роботі розглядається Моделювання методом пошарового наплавлення (FDM).

Моделювання методом пошарового наплавлення (англ. Fused deposition modeling (FDM)) - технологія адитивного виробництва, широко використовувана при створенні тривимірних моделей, для прототипування і в промисловому виробництві.

Технологія FDM передбачає створення тривимірних об'єктів за рахунок нанесення послідовних шарів матеріалу, які повторюють контури цифрової моделі. Як правило, в якості матеріалів для друку виступають термопластики, що поставляються у вигляді катушок ниток або прутків.

Технологія FDM була розроблена С. Скоттом Трампом в кінці 1980-х і вийшла на комерційний ринок в 1990 році. Оригінальний термін «Fused Deposition Modeling» і аббревіатура FDM є торговими марками компанії Stratasys. Ентузіасти 3D-друку, учасники проекту RepRap, придумали аналогічний термін «Fused Filament Fabrication» ( «Виробництво методом наплавлення ниток») або FFF для використання в обхід юридичних обмежень. Терміни FDM і FFF еквівалентні за змістом і застосуванням.

Виробничий цикл починається з обробки тривимірної цифрової моделі. Модель в форматі STL розділяється на шари і орієнтується найбільш вдалим чином для друку. При необхідності генеруються підтримуюючі структури, необхідні для друку консольних елементів. Деякі пристрої дозволяють використовувати різні матеріали під час одного виробничого циклу. Наприклад, можливий друк моделі з одного матеріалу з друком опор з іншого, легкокорозійного матеріалу, що дозволяє з легкістю видаляти підтримуючі структури після завершення процесу друку. Альтернативно, можливий друк різними кольорами одного і того ж виду пластику при створенні однієї моделі.

Виріб, або «модель», проводиться видавлюванням ( «екструзією») і нанесенням мікрокрапель розплавленого термопластика з формуванням послідовних шарів, що застигають відразу після екструдкування.

Пластикову нитку розмотується з котушки і постачається в екструдер - пристрій, оснащений механічним приводом для подачі нитки, нагрівальним елементом для плавки матеріалу і соплом, через яке здійснюється безпосередньо екструзія. (рис. 1.6). Нагрівальний елемент необхідний для нагрівання сопла, яке в свою чергу плавить пластикову нитку і подає розплавлений матеріал на поверхню. Як правило, верхня частина сопла навпаки охолоджується за допомогою вентилятора для створення різкого градієнта температур, необхідного для забезпечення плавної подачі матеріалу.

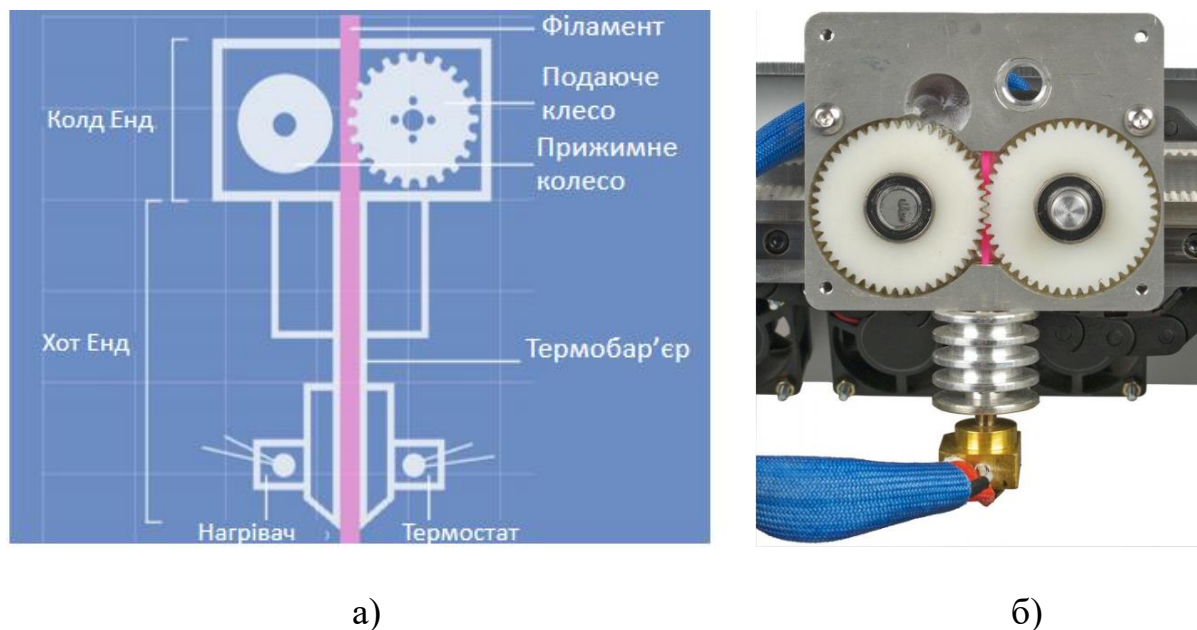


Рис. 1.6. Принципова схема роботи цільного екструдера FDM-принтера (а)  
та розріз екструдера (б)

Технологія FDM відрізняється високою гнучкістю, але має певні обмеження. Хоча створення підтримуючих структур можливо при невеликих кутах нахилу, у випадку з великими кутами необхідне використання штучних опор, як правило, створених в процесі друку і відокремлюваних від моделі після завершення процесу.

Як витратні матеріали використовуються різні термопластики і композити, включаючи ABS, PLA, полікарбонати, поліаміди, полістирол, лігнін та багато інших. Як правило, різні матеріали дають вибір балансу між певними характеристиками міцності і температурними характеристиками.

### 1.3.2. Аналіз конструкції та життєвих циклів різних компонок 3D-принтерів

Отже для процесу 3D-друку об'єкт повинен переміщатися в трьох площинах: вправо-вліво (вісь X), вперед-назад (вісь Y) і вгору-вниз (вісь Z) на столі (BED).

Зворотне справедливо і для друкуючої головки екструдера, тобто якщо об'єкт залишатиметься на місці, а переміщатися почне тільки головка (HEAD), то це не стане на заваді повноцінному процесу побудови деталі.

На сьогоднішній день існує два основних методи позиціонування екструдера: це переміщення в декартових координатах і циліндричних. Таким

чином можна скласти простий морфологічний ящик, який би дозволив відстежити класифікацію принтерів за кількістю ступенів рухів головки HEAD та столу (BED) у координатах  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Морфологічний ящик варіантів реалізації кінематики 3D-принтерів показаний на рис. 1.7. Загальна комбінація варіантів дорівнює 6, але розглянемо 4 найрозповсюдженіші.

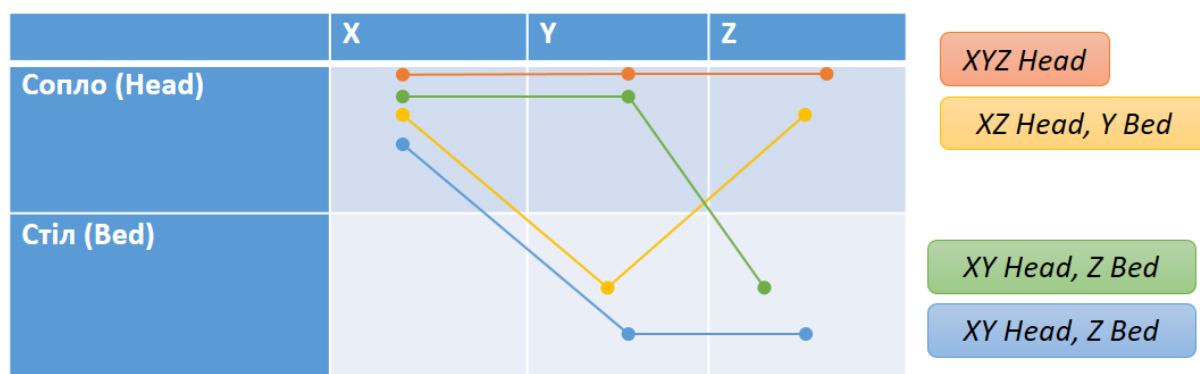


Рис. 1.7. Варіанти реалізації кінематики 3D-принтерів

Перша і найчисленніша група: екструдер переміщається по осях  $X$  і  $Z$ , а по осі  $Y$  переміщається платформа. (*XZ Head, Y Bed*). Цикл життя такого принтера показаний на рис. 1.8, а приклади реалізації на рис. 1.9.



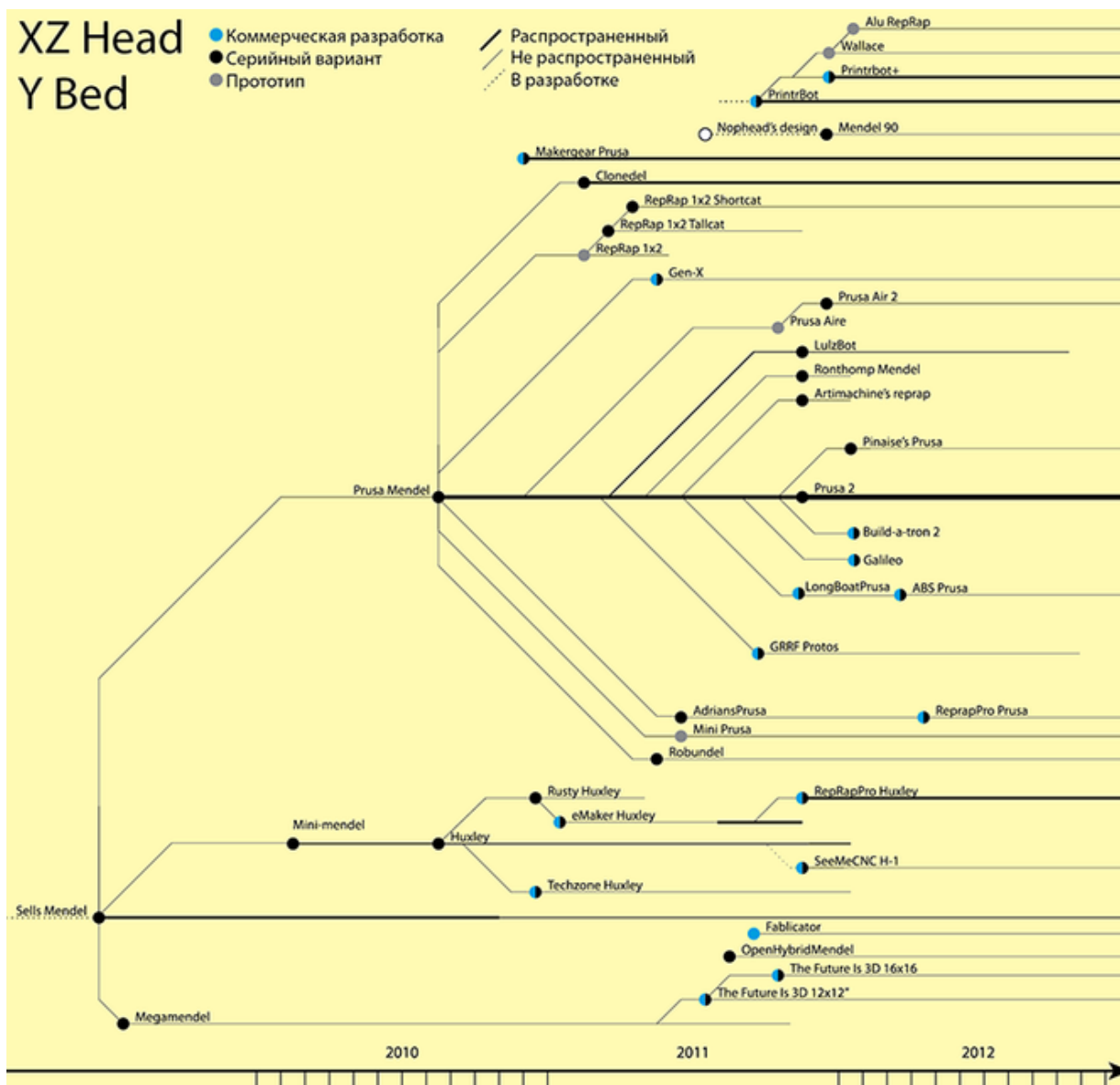
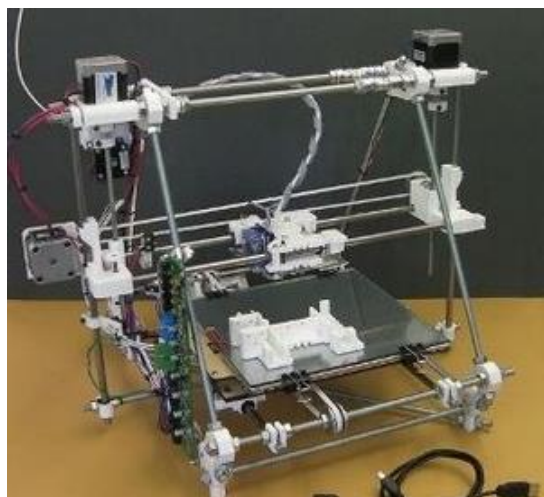
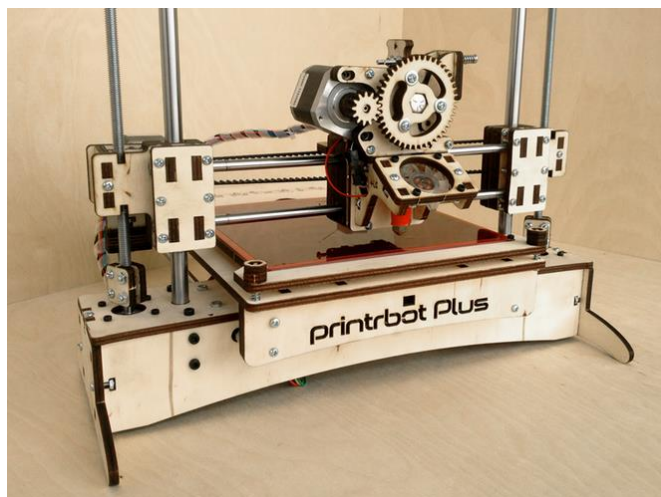


Рис. 1.8. Життєвий цикл принтерів *XZ Head, Y Bed*



а)



б)

Рис. 1.9. Приклади реалізації конструкції *XZ Head, Y Bed* Prusa Mendel – а, та PrintrBot – б.

Друга група принтерів. У цій групі робочий стіл з друкованим об'єктом рухається тільки вгору або вниз по осі Z, а по осях X, Y рухається друкуюча головка екструдера. (*XY Head, Z Bed*). Життєвий цикл таких принтерів наведений на рис. 1.10 А варіанти реалізації на рис. 1.11.

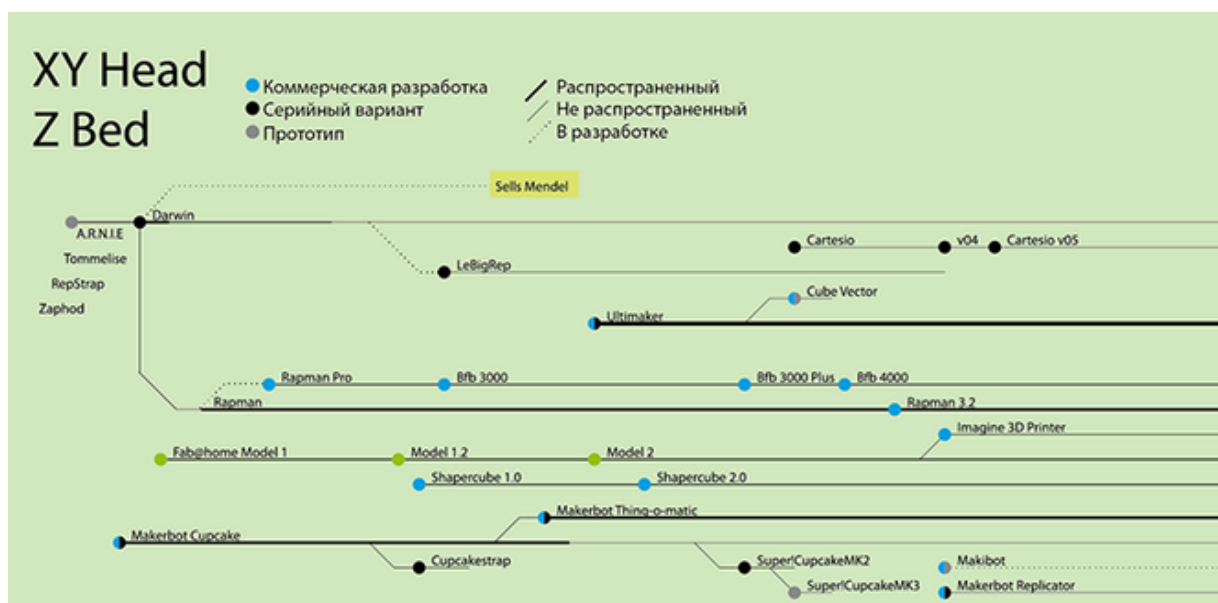
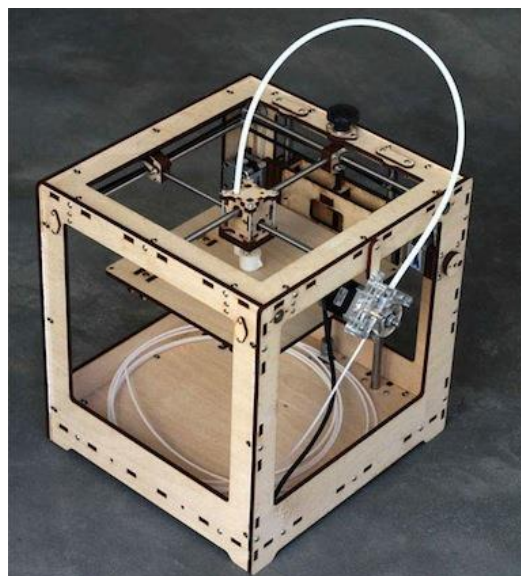


Рис. 1.10. Життєвий цикл 3D-принтерів з компоновкою *XY Head, Z Bed*.



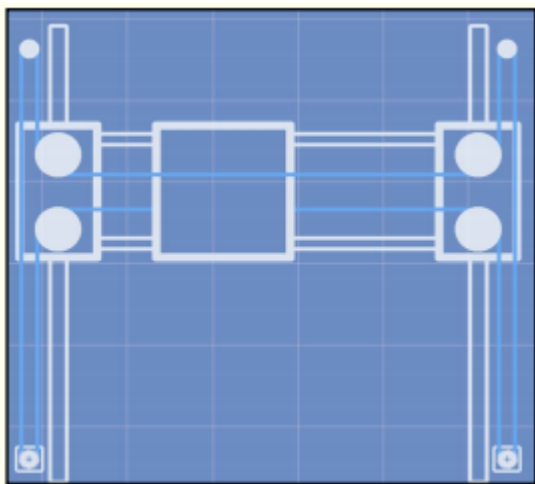
а)



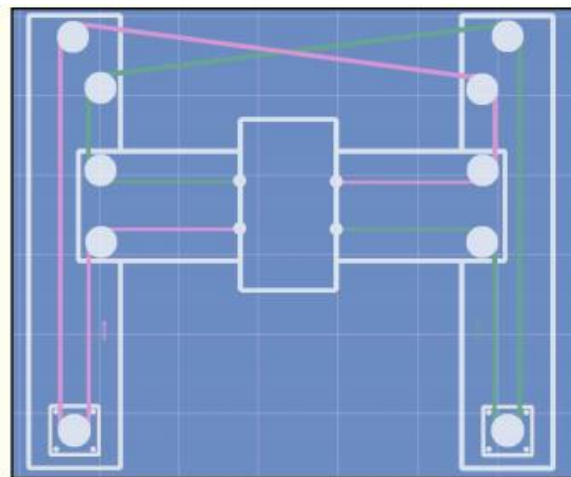
б)

Рис. 1.11. Приклади реалізації конструкції *XY Head, Z Bed, Replicator* – а, та *Ultimaker* – б.

Для розвантаження модуля, що переміщується в площині X-Y, компаніями були запропоновані різні варіанти реалізації кінематичних ланцюгів. Головна задача, зробити, так аби двигуни не переміщувалися разом з платформою. Найцікавіші варіанти реалізації системи ременів показані на рис.1.12



а)



б)

Рис. 1.12. Деякі варіанти реалізації кінематичних ланцюгів для переміщення модуля в площині X-Y, для принтерів *XY Head, Z Bed*.  
Конструкція Hbot – а, та CoreXY – б.

Третя група. Схема, за якою головка переміщується по осі X, а робочий стіл - по осях Y і Z, не отримала широкого поширення через складну реалізацію конструкції і налагодження пристрою. *X Head, YZ Bed*. Життєвий цикл таких принтерів показаний на рис. 1.13



Рис. 1.13. Життєвий цикл 3D-принтерів з компоновкою *X Head, YZ Bed*.

Цей дипломний проект присвячений реалізації та вдосконаленню компоновки принтерів з нерухомою платформою (*XYZ Head*). Поки що такі принтери не набули комерційної популярності, через складність конструкції та наладки, але мають цілий ряд переваг над іншими групами принтерів. Детальний аналіз та порівняння з іншими компоновками буде наведений в наступних розділах даного дипломного проекту. Життєвий цикл принтерів *XYZ Head* показаний на рис.1.14

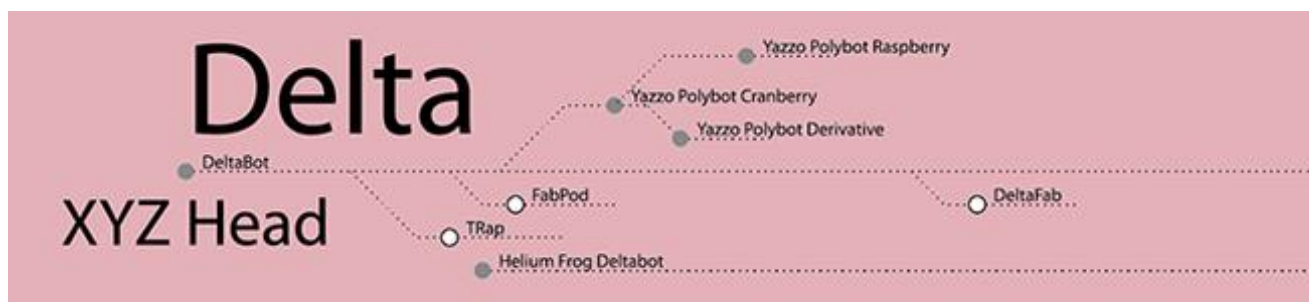


Рис. 1.14. Життєвий цикл 3D-принтерів з компоновкою *XYZ Head*.

#### 1.4. Мета і задачі досліджень

На сьогоднішній день налагодження будь-якого виробництва потребує нових підходів, врахування додаткових факторів при виборі обладнання та технологій. Так, крім звичних показників продуктивності, якості та безпеки всесвітньо враховуються додаткові вимоги до оптимізації виробництва з точки зору енергоефективності та екологічності. Такі положення можна втілити тільки за рахунок пошуку нових рішень [11,12]. Зокрема саме розвиток технологічного обладнання з МПС є одним з шляхів реалізації сучасних підходів.

Таким чином, дана дисертація покликана висвітлити підходи та процеси проектування обладнання з врахуванням сучасних вимог на прикладі налагодження дрібносерійного виробництва деталей з пластичних матеріалів з використанням адитивних технологій, тобто формоутворення виробів шляхом пошарового нанесення розплавленого PLA – пластику за визначеними траєкторіями руху робочих органів (РО), визначеними в програмі керування верстатом, та забезпечення зняття мінімального припуску ріжучим інструментом із поверхонь сформованої заготовки.

Основні принципи майбутнього підходу до виробництва наведені на блок-схемі (рис. 2.1) . Так, сама заготовка отримана за технологією трьох вимірних вирощування виробів вже на стадії 3D-друку є максимально наближеною до готової деталі. Тому процес її фінішної обробки потребує зняття мінімальних припусків на великих швидкостях різання [13]. А це в свою чергу зумовлює нижчі вимоги до жорсткості верстата, а відповідно зменшення його металоємкості. В цілому такий підхід є значно енергоефективнішим!

Крім того дана дисертація є невід’ємною частиною Науково-дослідної роботи № 0116U006641 від 04.07.2016 р. "Розробка технічної системи «Біонічний маніпулятор» і дослідження її кінематики для відновлення функцій людських пальців". В ході виконання. НДР вирішується ряд задач.

Існувала і існує проблема відтворення дієздатності людини за рахунок використання штучно створених кінцівок з маніпулюючими рухами від

біосигналів. В умовах пришвидшеного науково-технічного прогресу це потребує нових ідей, нових принципів дії і винаходів, тому що традиційні підходи, які засновані на методі «проб і помилок», вже не дозволяють генерувати ідеї необхідної якості та в потрібній кількості.

Запропонована схема (рис. 1.15) показує загальний процес синтезу ТС «Біонічний маніпулятор» [28-30]. Ідея роботи полягає в створенні такої антропоморфної мехатронної кінцівки руки людини, що дозволяє відтворити всі біомеханічні особливості людського тіла і функціональні можливості кінцівки руки людини. Кінцевий результат можна звести до синтезу трьох технічних засобів на основі однієї твердотільної моделі (рис. 1.16. п.1), а саме, конструювання:

- протезу, як елементу медичного устаткування;
- гнучкої захватної системи робота-маніпулятора для використання такого засобу дистанційно у військових цілях та/або у місцях, небезпечних для людського життя;
- адаптивного ( з штучним інтелектом). [2,3]



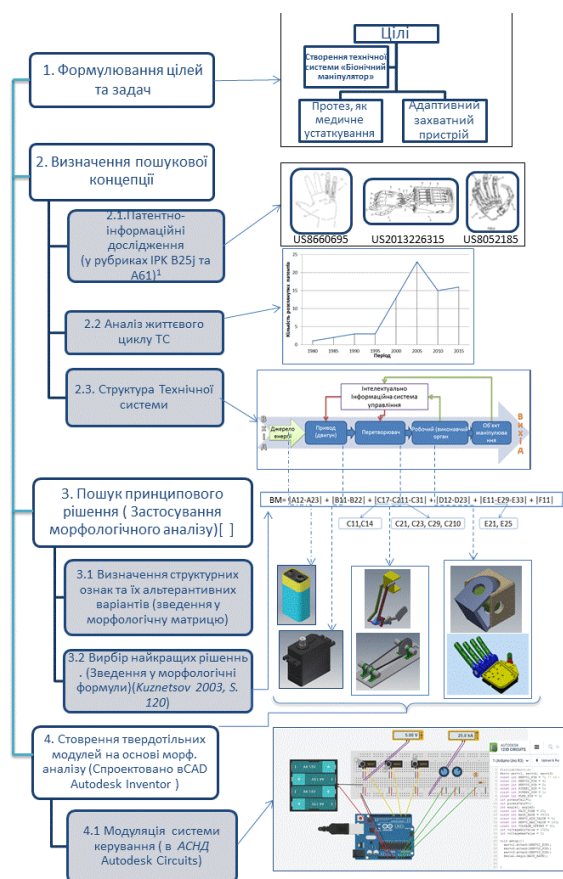


Рис. 1.15. Схема, що показує основні кроки при застосованні системно-морфологічного аналізу до створення ТС «Біонічний маніпулятор»

В процесі морфологічного синтезу БМ з врахуванням багатьох факторів та проведенням відповідних досліджень (див. Розділ 4) було вирішено, що усі корпусні деталі БМ будуть виготовлені на 3D-принтері. Це стало однією з передумов створення 3D-принтера на основі триглайду, що став предметом дослідження цього дипломного проекту.

В процесі роботи над створенням ТС «Біонічний маніпулятор» у співавторстві було опубліковано 8 тез доповідей у збірниках всеукраїнських та міжнародних конференцій. Студенти-співучасники проекту виступали з Доповідями на декількох конференціях в КПІ ім. Ігоря Сікорського, а також висвітлювали результати роботи у інших містах України.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення техніко-економічних показників малогабаритного Технологічного обладнання, зокрема FDM 3D-принтерів з комп'ютерним керуванням за рахунок синтезу нових конструкцій на основі каркасних несучих систем, використанні МПС і модульного принципу з обґрунтуванням їх раціональних параметрів, автоматизованого налагодження точності переміщень РО малогабаритного обладнання. А також створення науково-навчальної бази, для можливості запровадження результатів цієї роботи у навчальний процес.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні задачі:

1. Виконати аналіз відомих конструкцій 3D-принтерів, їх кінематичних схем, типів, а також методів синтезу нових конструкцій.
2. Сформулювати критерії вибору раціональних компоновань малогабаритного ТО на рівнях синтезу структур, схем і конструкцій.
3. З використанням багаторівневого морфологічного підходу синтезувати нові конструкції малогабаритних верстатів на основі обмеженої кількості модулів із застосуванням концепції каркасних несучих систем, МПС і модульного принципу.
4. Встановити математичні залежності розрахунку позиціонування ВО для комп'ютерного керування верстатами з МПС каркасної будови.
5. Розробити методику, конструкції та програмне забезпечення для автоматизованого калібрування та підвищення точності ТО з МПС.
6. Розробити прилади для підвищення жорсткості модуля паралельних штанг в ТО з МПС.
7. Провести дослідження щодо можливості використання друкованих модулів, у несучих системах різних механізмів.
8. Теоретично дослідити та експериментально підтвердити працездатність і ефективність синтезованих конструкцій верстатів, встановивши



залежності технологічних і конструктивних параметрів від геометрії компонування та видів навантажень.

9. Розробити рекомендації по практичному впровадженню результатів досліджень і нових малогабаритних верстатів з комп'ютерним керуванням у виробництво і навчальний процес.

## **РОЗДІЛ 2. СТВОРЕННЯ ДОСЛІДНОГО ЗРАЗКА 3D-ПРИНТЕРА**

### **2.1. Морфологічний синтез 3D-принтера та вибір кращого варіанту компоновки з використанням методу розташування пріоритету (парних порівнянь)**

На сьогоднішній день налагодження будь-якого виробництва потребує нових підходів, врахування додаткових факторів при виборі обладнання та технологій. Так, крім звичних показників продуктивності, якості та безпеки всесвітньо враховуються додаткові вимоги до оптимізації виробництва з точки зору енергоефективності та екологічності. Такі положення можна втілити тільки за рахунок пошуку нових рішень. Зокрема саме розвиток технологічного обладнання з МПС є одним з шляхів реалізації сучасних підходів.

Таким чином дана робота покликана висвітлити підходи та процеси проектування обладнання з врахуванням сучасних вимог на прикладі налагодження дрібносерійного виробництва з використанням адитивних технологій.

Основні принципи майбутнього підходу до виробництва наведені на блок-схемі (рис.2.1). Так, сама заготовка отримана за технологією трьох вимірних вирощування виробів вже на стадії 3D-друку є максимально наближеною до готової деталі. Тому процес її фінішної обробки потребує зняття мінімальних припусків на великих швидкостях різання [6]. А це в свою чергу зумовлює нижчі вимоги до жорсткості верстата, а відповідно зменшення його металоємкості. В цілому такий підхід є значно енергоефективнішим!

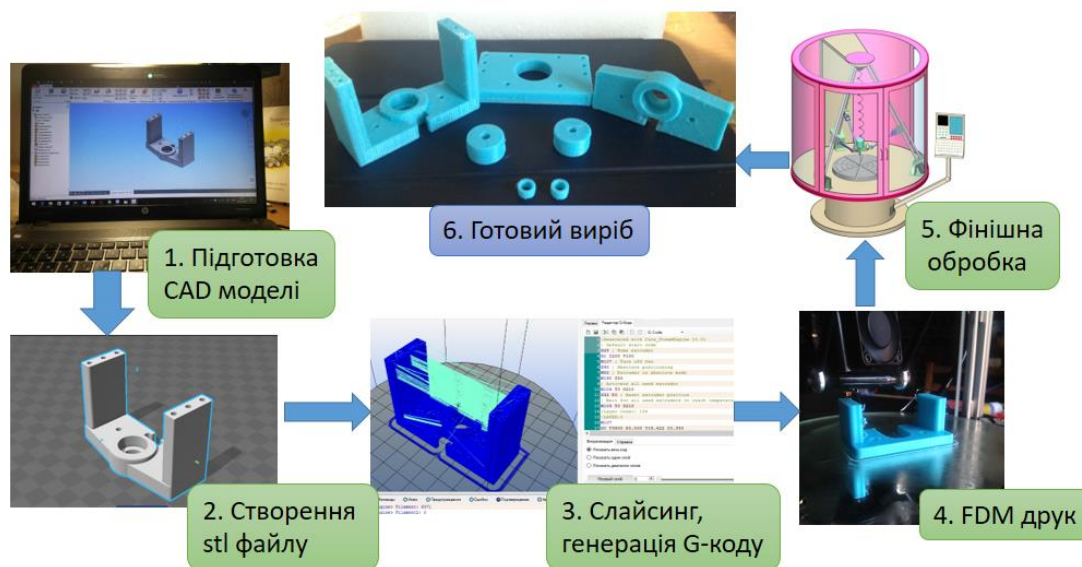


Рис. 2.1. Блок-схема майбутнього підходу до виробництва з використанням адитивних технологій.

В контексті вищевикладеного підходу задача розробки обладнання МПС набуває нового значення. Так, основною проблемою 3D-друку на даний час є мала продуктивність, через малі швидкості руху робочого органу. Розробка ж 3D-принтерів з структурами паралельної кінематики у значній мірі вирішує цю проблему. У таких механізмах приводи переміщень кінематичних ланок розміщені на нерухомій несучій системі, що обумовлює значне зменшення рухомих мас механізму та дозволяє їм досягти величини прискорень до 50g (в експериментальних моделях) та 10-12g (у виробничому технологічному обладнанні) [5,19,21]. Крім того у порівнянні з звичайними компоновками (ортогональними), обладнання з МПС має нижчу металоємкість при однакових розмірах робочого простору.

В основу проектування 3D-принтера на базі триглайду покладено модульний принцип, тобто деякі деталі та вузли є уніфікованими і стандартними, а деякі потребують виготовлення відповідно до робочих креслень. Для усунення можливості похибок при складанні 3D-принтера слід спроектувати кожний вузол окремо. Крім того, при проектуванні, за ціль поставлено відтворити усі кінематичні пари та зв'язки для детального аналізу робочого простору, виключення можливості

виникнення геометричних замків, подальшого динамічного аналізу та перевірки несучої здатності конструкції за допомогою методу скінчених елементів.

Для синтезу оптимального 3D-принтеру з МПС на базі триглайду доцільно використовувати системні підходи до проектування Технічних систем. [4] Тому на першому етапі було складено структурну схему (рис.2.2) і розглянуто кожну ланку системи окремо.

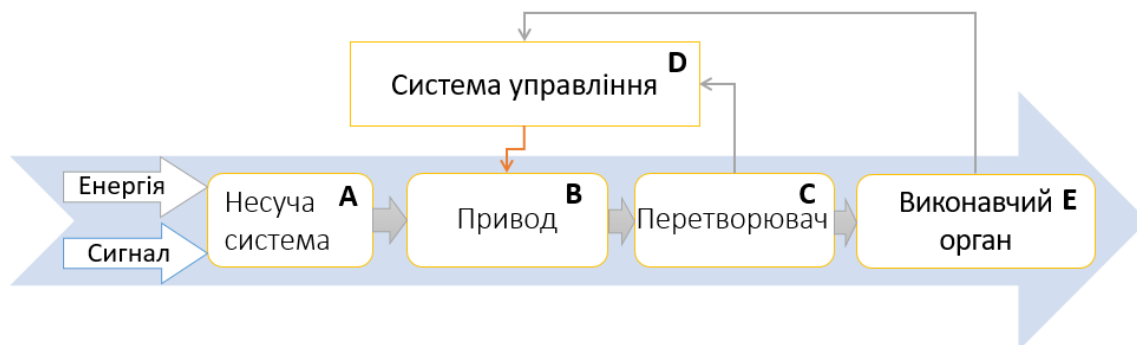


Рис. 2.2. Структурна схема 3D-принтера для системного аналізу конструкції та послідовного проектування

### 2.1.1. Синтез оптимальної каркасної несучої системи за методикою Кузнєцова Ю.М. та Степаненко О.О

Для синтезу оптимальної каркасної системи 3D-принтера на основі триглайду, а також для аналізу компоновок, що можуть бути застосовані до різного ТО з МПС застосуємо методику, що була запропонована у дисертаційній роботі к.т.н Степаненко О.О. «СИНТЕЗ МАЛОГАБАРИТНИХ ФРЕЗЕРНИХ ВЕРСТАТІВ З КОМП'ЮТЕРНИМ КЕРУВАННЯМ» на здобуття ступеня під керівництвом проф. д.т.н Кузнєцова Ю.М [11].

Для ефективної розробки будь-яких технічних систем важливо орієнтуватися в багатьох її характеристиках. По мірі еволюції технічної системи, деякі з них набувають сталий характер, досягши меж свого розвитку, а інші стрімко вдосконалюються, в результаті чого система наповнюється рядом нових характеристик. Ці характеристики виражають ступінь досконалості системи і формують критерії, що її характеризують. Умовою прогресивного розвитку технічної системи є покращення одних критеріїв без погіршення інших [11,9].

Найчастіше технічні системи оцінюють за наступними групами критеріїв:

- Функціональні критерії – характеризують зовнішні показники реалізації функції системи.
- Технологічні критерії – характеризують технологічні можливості і складність виготовлення системи.
- Економічні критерії – визначають економічну доцільність реалізації функцій системи.
- Антропогенні критерії – визначають питання взаємодії людини з технічною системою.

Кожна категорія цих критеріїв може містити окремі види характеристик, які складаються з комплексів конкретних вимог до проектування окремих моделей верстатів різного призначення.

В процесі синтезування нових каркасних компонувань технологічного обладнання, який включає в себе наступні етапи: структурний синтез (вибір форми основи і каркасної несучої системи з симетричних правильний фігур – тіл Платона і напівправильних, які відповідають формулі Ейлера), схемний синтез (вибір методу перетворення рухів і розташування виконавчих органів), конструкційний (формування конструктивних особливостей верстату), кількість критеріїв зростає по мірі проходження кожного етапу синтезу, що проілюстровано на рис. 2.3. Для відбору кращих компонувань на різних етапах синтезу формується ряд власних і комплексних критеріїв з їх ваговими коефіцієнтами.

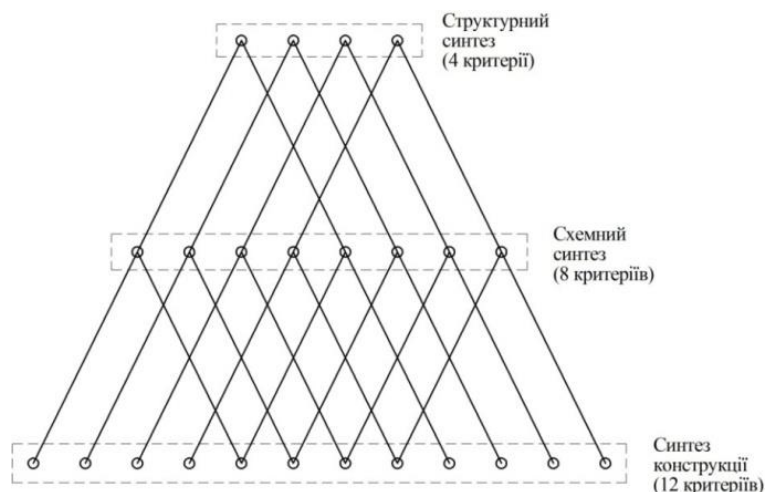


Рис. 2.3. Дерево критеріїв на різних етапах синтезу

В табл. 2.1 включені основні критерії, які стосуються малогабаритних фрезерних верстатів. Процес вибору оптимальних компоувальних рішень полягає в тому, щоб формалізувати ці критерії і виразити кожен чисельно, після чого стає можливим оцінити кожний варіант компоування за бальною системою і виявити формально кращий.

Таблиця 2.1

Критерії вибору кращих компоувань на різних етапах синтезу

Стадії проектування	Функціональні критерії	Технологічні критерії	Економічні критерії	Антропогенні критерії
Синтез структур	Внутрішній об'єм несучої системи ( $K_{во}$ )	Центр мас несучої системи ( $K_{цм}$ )	Металоемність ( $K_{мт}$ )	Зручність обслуговування робочої зони ( $K_{зо}$ )
Синтез схем	Ступінь рухомості ВО/заготовки ( $K_{ср}$ )	Складність керування ( $K_{ск}$ )	Металоемність ( $K_{мт}$ )	Зручність обслуговування робочої зони ( $K_{зо}$ )
	Продуктивність ( $K_{пр}$ )	Технологічні можливості ( $K_{тм}$ )		
	Внутрішній об'єм несучої системи ( $K_{во}$ )	Центр мас несучої системи ( $K_{цм}$ )		
Синтез конструкцій	Точність ( $K_{тч}$ )	Технологічна гнучкість ( $K_{тг}$ )	Трудомісткість виготовлення ( $K_{тв}$ )	Ергономічність ( $K_{ер}$ )
	Жорсткість ( $K_{жр}$ )	Надійність ( $K_{нд}$ )	Вага ( $K_{вг}$ )	Безпечність ( $K_{бз}$ )

	Об'єм робочої зони ( $K_{pz}$ )	Центр мас несучої системи ( $K_{цм}$ )	Металоемність ( $K_{мт}$ )	Естетичність ( $K_{ес}$ )
--	---------------------------------	--	----------------------------	---------------------------

Для пошуку раціональних конструкцій несучих систем малогабаритного ТО, в тому числі і 3D-принтерів скористаємось морфологічною матрицею (рис. 2.4), яка складається з трьох морфологічних ознак: основи, каркасу і траверси. Кожна ознака включає в себе обмежену кількість альтернатив.

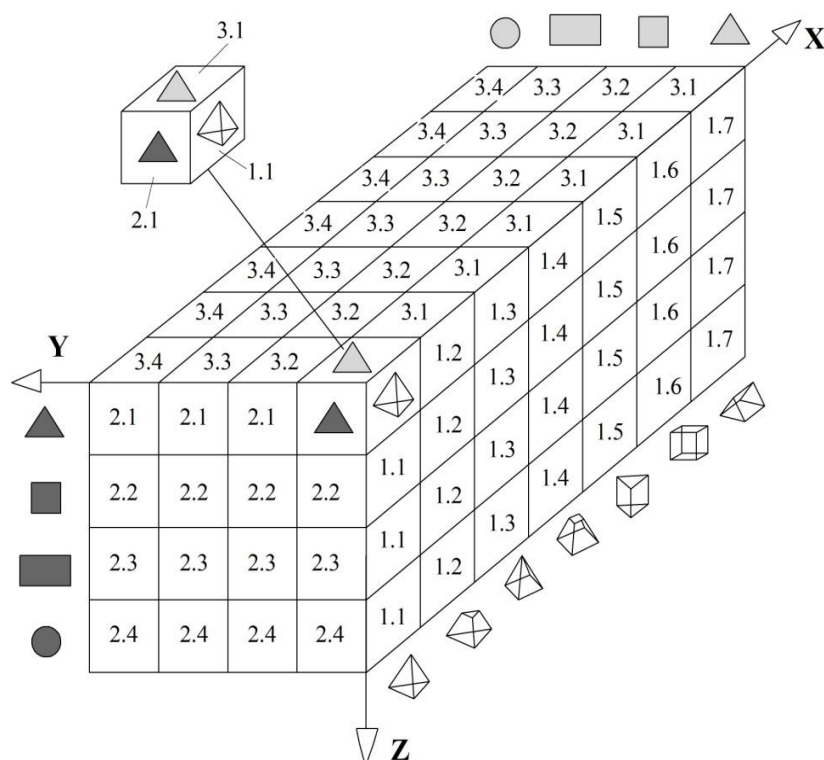


Рис. 2.4. Морфологічна матриця несучих систем верстатів

Загальна кількість варіантів ( $N$ ) розраховується за формулою:

$$N = \prod_{i=1}^n K_i, \quad (2.1)$$

де  $K_i$  – кількість альтернатив  $i$ -тої морфологічної ознаки функції;  $n$  – кількість ознак.

$$N = 7 \cdot 4 \cdot 4 = 112 \quad (2.2)$$

При проектуванні необхідно відібрати сумісні варіанти компоновань:

$$N_c = N - N_{nc}, \quad (2.3)$$

де  $N$  – загальна кількість варіантів морфологічної матриці;

$N_C$  – кількість сумісних варіантів;

$N_{HC}$  – кількість несумісних варіантів.

$$N_{HC} = \sum_{i=1}^{n-1} (K_i, K_{i+1}), \quad (2.4)$$

де  $n-1$  – кількість несучих пар ознак;

$K_i, K_{i+1}$  – кількість альтернатив несучих пар ознак.

Таким чином, сумісні варіанти розраховуються за формулою:

$$N_C = \prod_{i=1}^n K_i - \sum_{i=1}^{n-1} (K_i, K_{i+1}) \quad (2.5)$$

Перебір варіантів на сумісність у розгорнутому вигляді здійснюється наступним чином та формується таблиця сумісності з виділенням сумісних варіантів:

$$\Sigma [(K_1 - K_2) + (K_2 - K_3) + \dots + (K_{i-1} - K_i)] \quad (2.6)$$

Таблиця 2.2

Таблиця сумісності з виділенням сумісних варіантів

1	-	2	1	-	3	2	-	3
1.1	-	2.1	1.1	-	3.1	2.1	-	3.1
1.1	-	2.2	1.1	-	3.2	2.1	-	3.2
1.1	-	2.3	1.1	-	3.3	2.1	-	3.3
1.1	-	2.4	1.1	-	3.4	2.1	-	3.4
1.2	-	2.1	1.2	-	3.1	2.2	-	3.1
1.2	-	2.2	1.2	-	3.2	2.2	-	3.2
1.2	-	2.3	1.2	-	3.3	2.2	-	3.3
1.2	-	2.4	1.2	-	3.4	2.2	-	3.4
1.3	-	2.1	1.3	-	3.1	2.3	-	3.1
1.3	-	2.2	1.3	-	3.2	2.3	-	3.2
1.3	-	2.3	1.3	-	3.3	2.3	-	3.3
1.3	-	2.4	1.3	-	3.4	2.3	-	3.4
1.4	-	2.1	1.4	-	3.1	2.4	-	3.1
1.4	-	2.2	1.4	-	3.2	2.4	-	3.2
1.4	-	2.3	1.4	-	3.3	2.4	-	3.3
1.4	-	2.4	1.4	-	3.4	2.4	-	3.4
1.5	-	2.1	1.5	-	3.1			
1.5	-	2.2	1.5	-	3.2			
1.5	-	2.3	1.5	-	3.3			
1.5	-	2.4	1.5	-	3.4			
1.6	-	2.1	1.6	-	3.1			
1.6	-	2.2	1.6	-	3.2			
1.6	-	2.3	1.6	-	3.3			
1.6	-	2.4	1.6	-	3.4			
1.7	-	2.1	1.7	-	3.1			
1.7	-	2.2	1.7	-	3.2			
1.7	-	2.3	1.7	-	3.3			
1.7	-	2.4	1.7	-	3.4			



Якщо врахувати і прибрати несумісні варіанти, то маємо:

$$N = \begin{vmatrix} 1.1 & 2.1 & 3.1 \\ 1.2 & 2.2 & 3.2 \\ 1.3 & & \\ 1.4 & & \\ 1.5 & & \\ 1.6 & & \\ 1.7 & & \end{vmatrix} \quad (2.7)$$

$$N = 7 \cdot 2 \cdot 2 = 28 \quad (2.8)$$

Вирахувавши, що всього сумісних варіантів  $N_C = 28$ , відповідно можна знайти несумісні:

$$N_{NC} = N - N_C = 112 - 28 = 84 \quad (2.9)$$

Для порівняння за власними і комплексним критеріями з числа сумісних варіантів було обрано наступні чотири правильні геометричні фігури:

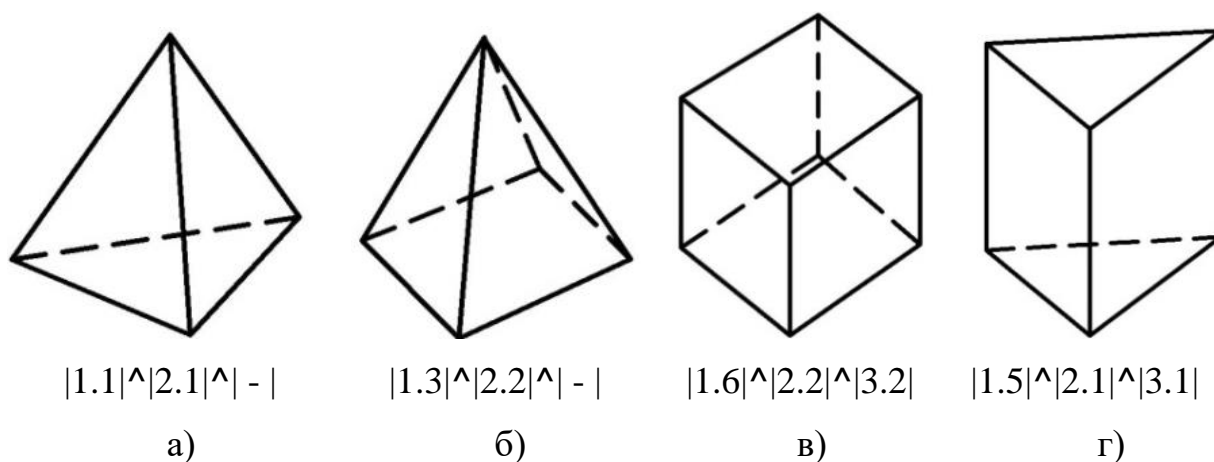


Рис. 2.5. Геометричні фігури, обрані для порівняння, та їх морфологічні формули:

а) тригранна піраміда; б) чотиригранна піраміда; в) куб; г) призма

Для порівняння обраних геометричних фігур здійснимо кількісне визначення критеріїв оцінювання:

1) коефіцієнт зручності обслуговування визначається як співвідношення кількості граней ( $N$ ), які в реальності дають змогу обслуговувати верстат, до

максимальної кількості граней каркасу верстату ( $N_{max}$ ) без урахування верхньої та нижньої основи при розгляді обраних геометричних фігур (власний випадок = 4):

$$K_{30} = \frac{N}{N_{max}} = \frac{N}{4}. \quad (2.10)$$

2) коефіцієнт внутрішнього об'єму ( $K_{BO}$ ) на першому етапі синтезу буде визначатись, як об'єм геометричної фігури, які відповідає обраній конструкції каркасу, оскільки на даному етапі ще невідомі всі елементи (виконавчий орган, основні модулі та ін.), які в подальшому будуть впливати на внутрішній об'єм, а іншими словами на об'єм робочого простору.

Умовно, для спрощення розрахунку приймемо наступні параметри:

$h$  – висота, опущена на основу, буде дорівнювати ребру обраної геометричної фігури;

$a$  – ребро фігури, яке є стороною основи.

Відповідно, для нижніх основ всіх обраних геометричних фігур для проектування каркасу несучої системи, обрані правильні фігури, тобто квадрати чи рівносторонні трикутники.

Таким чином, для подальшого розрахунку приймемо:  $h = a = 10$  (умов.од.)

Після вирахування внутрішнього об'єму необхідно отриману величину розділити на 1000 для збереження рівноваги на рівні значень всіх інших коефіцієнтів.

$$K_{BO} = \frac{V_{\text{фігури}}}{1000}. \quad (2.11)$$

3) коефіцієнт металоємності каркасу ( $K_{МК}$ ) визначається як співвідношення кількості ребер ( $P_{\text{фігури}}$ ), які в реальності присутні в фігурі для даного komponування верстату, до максимальної кількості ребер каркасу верстату ( $P_{\Sigma}$ ) при розгляді обраних геометричних фігур (власний випадок – 12):

$$K_{МК} = \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{мах}}}, \text{ де } P_{\text{отр}} = \frac{P_{\Sigma}}{P_{\text{фігури}}} = \frac{12}{P_{\text{фігури}}} \Rightarrow P_{\text{мах}} = P_{\text{отр.3-гран.піраміди}} = 2 \quad (2.12)$$

4) коефіцієнт центра мас несучої системи ( $K_{ЦМ}$ ) визначено наступним чином. За допомогою САПР «Autodesk Inventor» було визначено координати центра мас геометричних фігур. Для цього було побудовано їх твердотільні 3D-моделі (рис 2.6) згідно розмірів  $h = a = 10$  (умов.од.) і за допомогою функції «Физические свойства модели» визначено мас-центрові характеристики. Для тригранної і чотиригранної піраміди відстань центра мас від нижньої основи виявилися однакова і становить  $h_{ЦМ} = 2,5$  (умов.од.), для куба і призми відстань центра мас аналогічно однакова і становить  $h_{ЦМ} = 5$  (умов.од.) від основи.

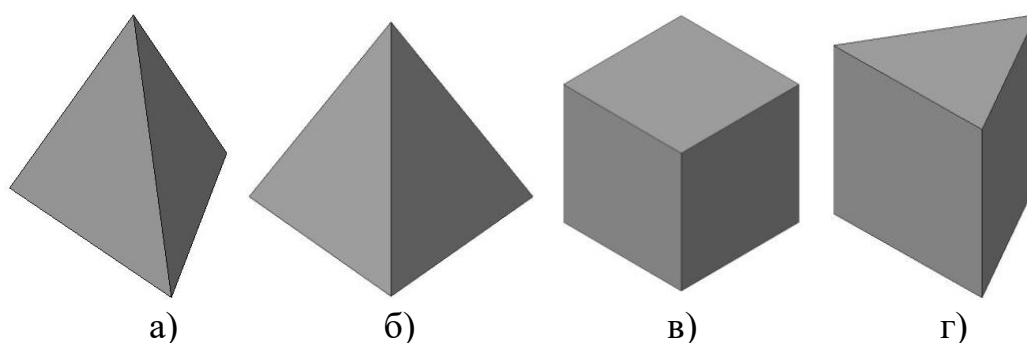


Рис. 2.6. Твердотільні 3D-моделі обраних геометричних фігур: а) тригранна піраміда; б) чотиригранна піраміда; в) куб; г) призма

$$K_{ЦМ} = \frac{K_{отр}}{K_{max}}, \text{ де } K_{отр} = \frac{S_{очн}}{h_{ЦМ}} \Rightarrow K_{max} = K_{отр.4-гран.піраміди} \quad (2.13)$$

Для формування комплексного критерію визначаємо вагові коефіцієнти для кожного з критеріїв, встановлених на етапі структурного синтезу.

- 1) коефіцієнт зручності обслуговування ( $K_{зо}$ ) –  $\alpha_1$ ;
- 2) коефіцієнт внутрішнього об'єму ( $K_{во}$ ) –  $\alpha_2$ ;
- 3) коефіцієнт металоємності каркасу ( $K_{мк}$ ) –  $\alpha_3$ ;
- 4) коефіцієнт центра мас несучої системи ( $K_{ЦМ}$ ) –  $\alpha_4$ .

При виборі кращого варіанту на перших етапах проектування зручно використовувати метод розстановки пріоритетів [11,12], який часто використовується для знаходження вагових значень у комплексному критерії якості.

Метод розстановки пріоритету – один з найефективніших методів якісної оцінки варіантів, оскільки він дозволяє проводити багатокритеріальний, якісний аналіз на основі експертизи варіантів побудови (конструювання, проектування) об'єктів. Даний метод передбачає попарне зіставлення та порівняння об'єктів по принципу "краще, важливіше" /  $>$  /, "гірше" /  $<$  /, та "рівноцінно" /  $=$  /, а також спеціальний алгоритм обробки отриманих даних.

При розстановці пріоритету для вагових коефіцієнтів необхідно провести їхнє попарне порівняння у вигляді систем порівнянь та побудувати граф турніру варіантів. Перший стовбець відповідає за порівняння першого коефіцієнта  $\alpha_1$  з іншими, другий – за порівняння другого  $\alpha_2$  з тими, що залишились, та третій  $\alpha_3$  – відповідно. Важливо знати загальну кількість парних порівнянь при існуючих та даних варіантах ( $\alpha_1 \dots \alpha_4$ ), тобто умовах  $m$ :

$$M = \frac{m(m-1)}{2}. \quad (2.14)$$

В даному випадку  $m = 4$ , оскільки  $\alpha_1 \dots \alpha_4$ , відповідно число порівнянь та рішень буде дорівнювати  $M = \frac{4(4-1)}{2} = 6$ .

Відповідно необхідно мати 6 порівнянь.

$$\left| \begin{array}{l} \alpha_1 < \alpha_2 \\ \alpha_1 < \alpha_3 \\ \alpha_1 = \alpha_4 \end{array} \right| \left| \begin{array}{l} \alpha_2 < \alpha_3 \\ \alpha_2 > \alpha_4 \end{array} \right| \left| \begin{array}{l} \alpha_3 > \alpha_4 \end{array} \right| \quad (2.15)$$

При побудові графу турніру варіантів ребра між варіантами  $\alpha_i$  та  $\alpha_j$  відповідають вимогам:

$$\begin{array}{l} i > j \\ i = j \\ i < j \end{array} \left| \begin{array}{l} \longrightarrow \\ \longrightarrow \\ \longleftarrow \\ \longleftarrow \end{array} \right.$$

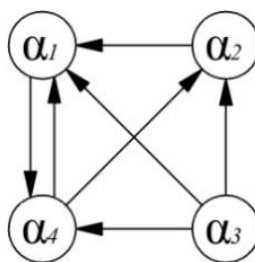


Рис. 2.7. Граф турніру вагових коефіцієнтів

Зазвичай приймають наступну систему кількісно співвідношення для даного типу порівняння:

$$a_{ij} = \begin{cases} 2 & a_i > a_j & \longrightarrow \\ 1 & a_i = a_j & \longleftrightarrow \\ 0 & a_i < a_j & \longleftarrow \end{cases} \quad (2.16)$$

Для визначення пріоритетнішого критерію необхідно, користуючись системою кількісного співвідношення, заповнити таблицю суміжності (табл. 2.3.)

Таблиця 2.3

Таблиця суміжності вагових коефіцієнтів

$\begin{matrix} j \\ i \end{matrix}$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\Sigma a_{ij}$	$P_i = (1)$	Пріоритет
$\alpha_1$	1	0	0	1	2	2/16	IV
$\alpha_2$	2	1	0	2	5	5/16	III
$\alpha_3$	2	2	1	2	7	7/16	I
$\alpha_4$	1	0	0	1	2	2/16	II
$\Sigma$	$m = 4 (\alpha_1 \dots \alpha_4) \Rightarrow \alpha_1 \cdot \alpha_1 = m \cdot m = m^2 = 4^2$				$\Rightarrow 16$	1	

З таблиці суміжності видно, що найпріоритетнішим коефіцієнтом на даному етапі синтезу є коефіцієнт металоємності каркасу ( $K_{МК}$ ) –  $\alpha_3$ .

Розставимо коефіцієнти за пріоритетом для проведення подальшого синтезу:

$$\alpha_3 > \alpha_2 > \alpha_1 > \alpha_4. \quad (2.17)$$

Для вирахування комплексного критерію на даному етапі присвоїмо відносні значення у десятковому вигляді.

$$\left| \begin{array}{l} \alpha_3 \longrightarrow 4 \\ \alpha_2 \longrightarrow 3 \\ \alpha_1 \longrightarrow 2 \\ \alpha_4 \longrightarrow 1 \end{array} \right| \left| \begin{array}{l} \alpha_3 = 4/10 \\ \alpha_4 = 3/10 \\ \alpha_2 = 2/10 \\ \alpha_1 = 1/10 \end{array} \right| \quad (2.18)$$

Комплексний критерій оцінки якості при проведенні синтезу для кожного компонування розраховується за формулою:

$$K_{\text{КОМ}} = \sum_{i=1}^{n=4} K_i \cdot \alpha_i = K_{\text{ЗО}} \cdot \alpha_1 + K_{\text{ВО}} \cdot \alpha_2 + K_{\text{МК}} \cdot \alpha_3 + K_{\text{ЦМ}} \cdot \alpha_4; \quad (2.19)$$

$$K_{\text{КОМ}} = K_{\text{ЗО}} \cdot 0.2 + K_{\text{ВО}} \cdot 0.3 + K_{\text{МК}} \cdot 0.4 + K_{\text{ЦМ}} \cdot 0.1. \quad (2.20)$$

Виконаємо розрахунки для обчислення власних і комплексних критеріїв.

Визначимо власні критерії для розрахунку комплексного критерію оцінювання *тригранної піраміди*.

$$K_{\text{ЗО}} = \frac{N}{N_{\text{max}}} = \frac{3}{4} = 0.75;$$

$$K_{\text{ВО}} = V = \frac{1}{3} S_{\text{ОСН}} \cdot h,$$

де  $h = a = 10$  (умов.од.) та для правильного трикутника  $S_{\text{ОСН}} = \frac{1}{4} \sqrt{3} \cdot a^2 = 43$

$$V = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{4} \sqrt{3} \cdot 10^2 \cdot 10 = 144.338 \text{ (умов.од.)}$$

$$K_{\text{ВО}} = 144.338 / 1000 = 0.14;$$

$$K_{\text{МК}} = \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{max}}}, \text{ де } P_{\text{отр}} = \frac{P_{\Sigma}}{P_{\text{фігури}}} = \frac{12}{6} = 2 \Rightarrow P_{\text{max}} = P_{\text{отр.3-гран.піраміди}} = 2.$$

$$K_{\text{МК}} = \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{max}}} = \frac{2}{2} = 1;$$

$$K_{\text{ЦМ}} = \frac{K_{\text{отр}}}{K_{\text{max}}}, \text{ де } h_{\text{ЦМ}} = 2,5 \text{ та } K_{\text{отр}} = \frac{S_{\text{ОСН}}}{h_{\text{ЦМ}}} = \frac{43}{2.5} = 17.2, K_{\text{max}} = K_{\text{отр.4-гран.піраміди}} = 40$$

$$K_{\text{ЦМ}} = \frac{K_{\text{отр}}}{K_{\text{max}}} = \frac{17.2}{40} = 0.43;$$

$$K_{\text{КОМ}} = 0.75 \cdot 0.2 + 0.14 \cdot 0.3 + 1 \cdot 0.4 + 0.43 \cdot 0.1 = 0.635. \quad (2.21)$$

Визначимо власні критерії для розрахунку комплексного критерію оцінювання *чотиригранної піраміди*.

$$K_{30} = \frac{N}{N_{\max}} = \frac{4}{4} = 1;$$

$$K_{BO} = V = \frac{1}{3} S_{\text{осн}} \cdot h, \text{ де } h = a = 10 \text{ (умов.од.) та для квадрату } S_{\text{осн}} = a^2 = 100$$

$$V = \frac{1}{3} \cdot 10^2 \cdot 10 = 333.333 \text{ (умов.од.)}$$

$$K_{BO} = 333.333 / 1000 = 0.33;$$

$$K_{MK} = \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\max}}, \text{ де } P_{\text{отр}} = \frac{P_{\Sigma}}{P_{\text{фігури}}} = \frac{12}{8} = 1.5 \Rightarrow P_{\max} = P_{\text{отр.3-гран.піраміди}} = 2.$$

$$K_{MK} = \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\max}} = \frac{1.5}{2} = 0.75;$$

$$K_{ЦМ} = \frac{K_{\text{отр}}}{K_{\max}}, \text{ де } h_{ЦМ} = 2,5 \text{ та } K_{\text{отр}} = \frac{S_{\text{осн}}}{h_{ЦМ}} = \frac{100}{2.5} = 40, K_{\max} = K_{\text{отр.4-гран.піраміди}} = 40$$

$$K_{ЦМ} = \frac{K_{\text{отр}}}{K_{\max}} = \frac{40}{40} = 1;$$

$$K_{\text{КОМ}} = 1 \cdot 0.2 + 0.33 \cdot 0.3 + 0.75 \cdot 0.4 + 1 \cdot 0.1 = 0.699. \quad (2.22)$$

Визначимо власні критерії для розрахунку комплексного критерію оцінювання *куба*.

$$K_{30} = \frac{N}{N_{\max}} = \frac{4}{4} = 1;$$

$$K_{BO} = V = a^3 \Rightarrow V = 10^3 = 1000 \text{ (умов.од.)}, S_{\text{осн}} = a^2 = 100$$

$$K_{BO} = 1000 / 1000 = 1;$$

$$K_{MK} = \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\max}}, \text{ де } P_{\text{отр}} = \frac{P_{\Sigma}}{P_{\text{фігури}}} = \frac{12}{12} = 1 \Rightarrow P_{\max} = P_{\text{отр.3-гран.піраміди}} = 2.$$

$$K_{MK} = \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\max}} = \frac{1}{2} = 0.5;$$

$$K_{ЦМ} = \frac{K_{\text{отр}}}{K_{\max}}, \text{ де } h_{ЦМ} = 5 \text{ та } K_{\text{отр}} = \frac{S_{\text{осн}}}{h_{ЦМ}} = \frac{100}{5} = 20, K_{\max} = K_{\text{отр.4-гран.піраміди}} = 40$$

$$K_{ЦМ} = \frac{K_{\text{отр}}}{K_{\max}} = \frac{20}{40} = 0.5;$$

$$K_{\text{КОМ}} = 1 \cdot 0.2 + 1 \cdot 0.3 + 0.5 \cdot 0.4 + 0.5 \cdot 0.1 = 0.75. \quad (2.23)$$

Визначення власні критерії для розрахунку комплексного критерію оцінювання *призми*.

$$K_{30} = \frac{N}{N_{\max}} = \frac{3}{4} = 0.75;$$

$$K_{BO} = V = S_{OCH} \cdot h,$$

де  $h = a = 10$  (умов.од.) та для правильного трикутника  $S_{OCH} = \frac{1}{4} \sqrt{3} \cdot a^2 = 43$

$$V = \frac{1}{4} \sqrt{3} \cdot 10^2 \cdot 10 = 433.013 \text{ (умов.од.)}$$

$$K_{BO} = 433.013 / 1000 = 0.43;$$

$$K_{MK} = \frac{P_{отр}}{P_{\max}}, \text{ де } P_{отр} = \frac{P_{\Sigma}}{P_{\text{фігури}}} = \frac{12}{9} = 1.33 \Rightarrow P_{\max} = P_{отр.3\text{-гран.піраміди}} = 2.$$

$$K_{MK} = \frac{P_{отр}}{P_{\max}} = \frac{1.33}{2} = 0.67;$$

$$K_{ЦМ} = \frac{K_{отр}}{K_{\max}}, \text{ де } h_{ЦМ} = 5 \text{ та } K_{отр} = \frac{S_{OCH}}{h_{ЦМ}} = \frac{43}{5} = 8.6 \Rightarrow K_{\max} = K_{отр.4\text{-гран.піраміди}} = 40$$

$$K_{ЦМ} = \frac{K_{отр}}{K_{\max}} = \frac{8.6}{40} = 0.22;$$

$$K_{КОМ} = 0.75 \cdot 0.2 + 0.43 \cdot 0.3 + 0.67 \cdot 0.4 + 0.22 \cdot 0.1 = 0.569. \quad (2.24)$$

Таким чином, найвищу оцінку отримав куб (0,75), на другому чотирьохгранна піраміда (0.69), далі тригранна піраміда (0.63) і остання – призма (0.56).

### 2.1.2. Вибір маханічного перетворювача та загальний синтез 3D-принтера

Зведемо інші основні морфологічні ознаки у морфологічну матрицю (табл. 2.4) для подальшого синтезу. Так за попереднім аналізом каркасних компонок, оберемо призматичну.

Таблиця 2.4

Морфологічна модель несучої системи 3D-принтера А						
А1. Розмір, мм	А2. Форма каркасу	А3. Форма основи	А4. Форма траверси	А5. Тип основи	А6. Матеріал основи	А7. Тип з'єднань
А1.1. $l < 600$	А2.1. призма	А3.1. Трикутник	А4.1. Трикутник	А5.1. Монолітн а конструкція	А6.1. Дерево	А7.1. Зварна конструкція



<b>A1.2.</b> 600<l<1000	<b>A2.2.</b> Піраміда	<b>A3.2.</b> Прямокутник	<b>A4.2.</b> Прямокутник	<b>A5.2.</b> Каркас	<b>A6.2.</b> Сталь	<b>A7.2.</b> На роз'ємних з'єднаннях елементів
<b>A1.3.</b> l>1000	<b>A2.3.</b> Куб	<b>A3.3.</b> Круг	<b>A4.3.</b> Круг	<b>A5.3.</b> Плита	<b>A6.3.</b> Алюміній	<b>A7.3.</b> Комбінація
					<b>A6.4.</b> Пластик	
					<b>A6.5.</b> Композит	

Кількість варіантів буде:  $N_{KC} = 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 3 = 3645$

Будуємо морфологічну матрицю:

$$M_{KC} = \begin{vmatrix} A1.1 & A2.1 & A3.1 & A4.1 & A5.1 & A6.1 & A7.1 \\ A1.2 & A2.2 & A3.2 & A4.2 & A5.2 & A6.2 & A7.2 \\ A1.3 & A2.3 & A3.3 & A4.3 & A5.3 & A6.3 & A7.3 \\ & & & & & A6.4 & \\ & & & & & A6.5 & \end{vmatrix}$$

Застосовуючи методику, що була використана при синтезі оптимальної геометрії каркасу, виберемо інші ознаки з морфологічної таблиці.

Застосовуючи метод експертної оцінки, обирається варіант несучої системи, що відповідає наступній морфологічній формулі:

$$\mathbf{A1.2-A2.2-A3.1-A4.1-A5.2-A6.3-A7.2} \quad (2.25)$$

На рис. 2.8 наведено схему, що відображає основні обрані морфологічні ознаки несучої системи 3D-принтера на основі твердотільних моделей.

Так A1.2 –геометричні розміри каркасу: 650 мм –висота призми, та 240 мм-довжина ребра основи. A2.2 –призматична несуча система з трикутниками A3.1 , A4.1 в основі. Відповідно сама система є каркасною A5.1 на основі верстатного алюмінієвого профілю A6.3, поєднуваного з іншими елементами системи за допомогою спеціального роз'ємного кріплення A7.2, а саме гвинтів з циліндричною головкою під шестигранний ключ DIN EN ISO 4762 M3×10 та спеціальними гайками для верстатного профілю.

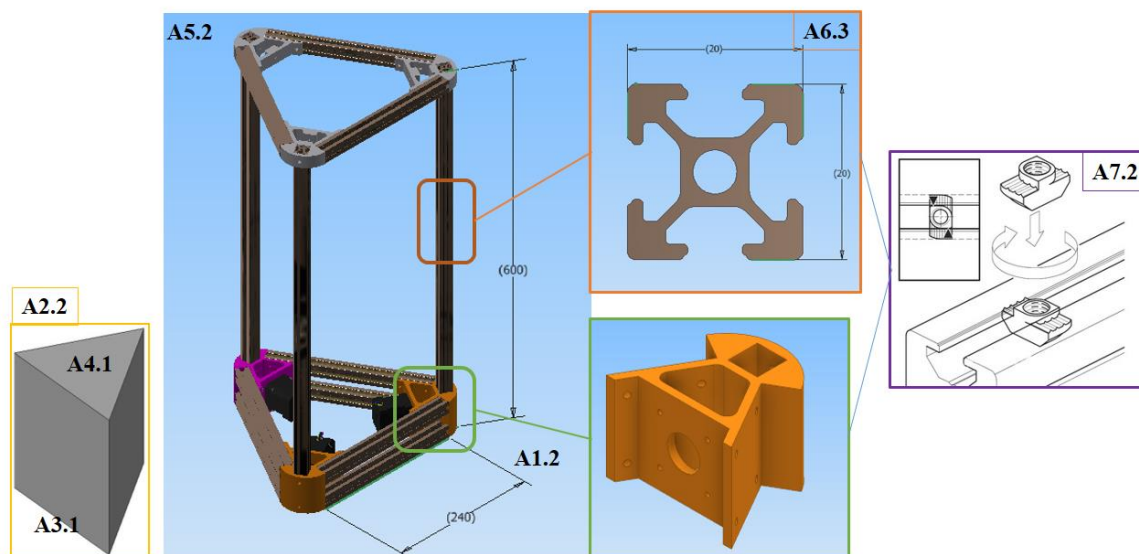


Рис. 2.8 Схема несучої системи з відображенням обраних морфологічних ознак

Складальний кресленик несучої системи, специфікація та робочі креслення деталей до нього наведені у Додатку А.

Після синтезу оптимальної несучої системи А, відповідно до структурної схеми (рис 2.2) слід визначити та обрати привод В та перетворювач С. Під «Перетворювачем» у даному дипломному проєкті розуміється сукупність вузлів та деталей, що передають обертальний момент від шківів привода на робочий орган механізму. Морфологічна модель 2.5) показує основні варіанти реалізації привода В та перетворювача С.

Таблиця 2.5

<i>Морфологічна таблиця варіантів реалізації привода В та перетворювача С.</i>					
<b>В Привод</b>		<b>С Перетворювач</b>			
<b>В1</b> Тип приводу	<b>В2</b> Розташування	<b>С1</b> Тип механічного перетворювача	<b>С2</b> Спосіб забезпечення лінійних переміщень каретки	<b>С3</b> Матеріал та тип штанг	<b>С4</b> Тип шарніра
<b>В1.1</b> Серводвигун	<b>В2.1</b> Поза 3D-принтером	<b>С1.1</b> Пасова передача	<b>С2.1</b> Лінійні циліндричні направляючі з підшипниками	<b>С3.1</b> Алюміній	<b>С4.1</b> Карданний шарнір Гука

<b>B1.2</b> Кроковий двигун	<b>B2.2</b> У 3D- принтері	<b>C1.2</b> Гвинтова передача	<b>C2.2</b> Переміщення вздовж верстатного профілю на полімерних роликах на підшипниках кочення	<b>C3.2</b> Пластик	<b>C4.2</b> Сферичні шарніри
<b>B1.3</b> Пневмо привод		<b>C1.3</b> Інше	<b>C2.3</b> Профільні рельсові направляючі для верстатів з ЧПК	<b>C3.3</b> Карбон	<b>C4.3</b> Магнітні шарніри

Як і при виборі найкращого варіанту реалізації несучої системи, послідовно за методом прийняття найкращих рішень, обираємо варіанти реалізації привода **В** та перетворювача **С**. Відповідно, маємо обрати ряд вимог до системи, що мають забезпечувати елементи приводу та перетворювача:

- Точність переміщень
- Довговічність;
- Жорсткість.

Однією з найважливіших морфологічних ознак, яка принципово впливає на кожен з в.в. характеристик, є ознака **C2** (Спосіб забезпечення лінійних переміщень каретки). Альтернативні варіанти реалізації показані на рис. 2.9. Варіант **C2.1** (рис.2.9 а) є недорогим та розповсюдженим. Але при робочих зонах по висоті більш 150 мм у лінійних підшипниках виникають автоколювання, що унеможливорює високу швидкість друку. Варіант **C2.2** характеризується більшою жорсткістю та вібростійкістю, але за рахунок зношення фторопластових роликів, у передачі з'являються зазори та зменшується точність. Цей варіант є недовговічним. Варіант **C2.3**. є найдорожчим, але у повній мірі забезпечує усі вищевказані вимоги. З каталогу продукції Нівін виходячи з:

- Типу обладнання, що проектується (3D-принтер) ;
- Обмежень по розміру (500 мм);

- Параметрів точності (допустимі відхилення  $\pm 0,05$  мм);
- Жорсткість ,

Попередньо обираємо рельсову направляючу серії MG, що використовуються для переміщення легких вантажів та є надточними. А саме: MGN-12H (12-типоромір, H- клас точності). Складальний кресленик напрямної див у додатках (МВ-31.17.ДПБ002.000). Використаємо метод експертної оцінки та з врахуванням вибору лінійних напрямних, отримаємо наступну морфологічну формулу, що характеризує ланки Привода **В** та Перетворювача **С**:

$$\mathbf{B1.2-B2.2-C1.1-C2.3-C3.3-C4.2} \quad (2.26)$$

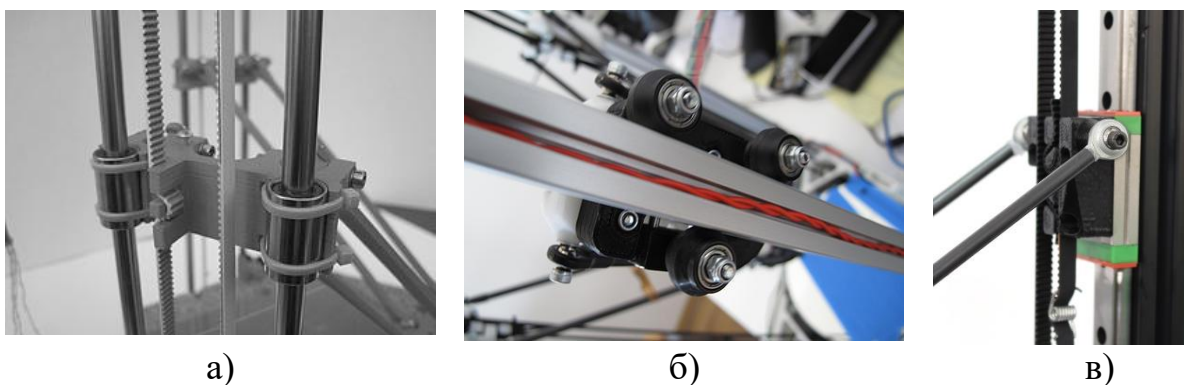
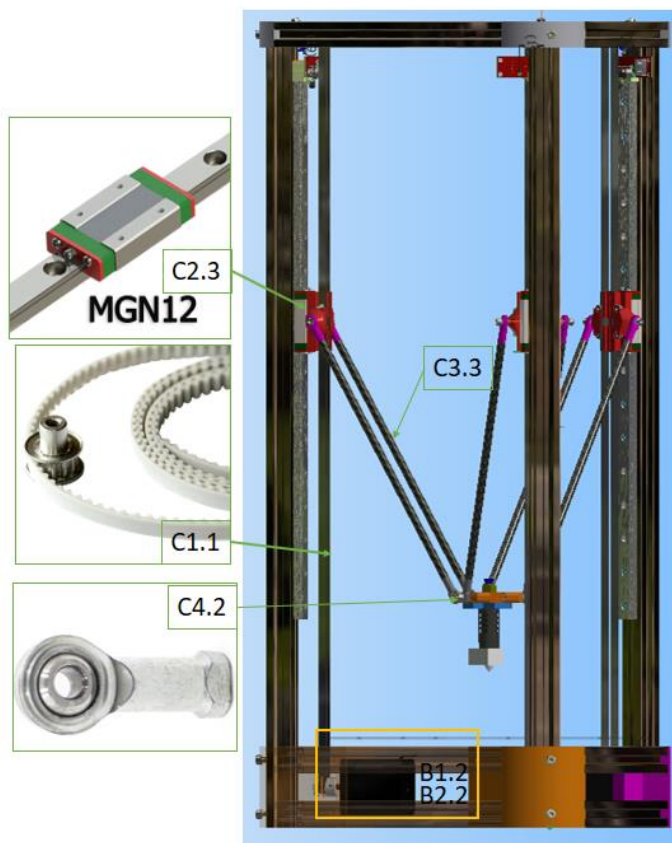


Рис. 2.9 Варіанти реалізації лінійних переміщень каретки. а- на лінійних циліндричних підшипниках, б- на фторопластових роликах, в- на профільних рельсових напрямних

Зведемо, отримані на даному етапі морфологічного синтезу ознаки та елементи у схему показана на рис. 2.10. Морфологічна формула, що описує несучу систему **А**, привод **В** та перетворювач **С**:

$$\mathbf{A1.2-A2.2-A3.1-A4.1-A5.2-A6.3-A7.2- B1.2-B2.2-C1.1-C2.3-C3.3-C4.2} \quad (2.27)$$



*Рис 2.10. Схема, що відображає, обрані за морфологічним аналізом основні ознаки привода В та перетворювача С*

Таким чином крутний момент від крокового двигуна (В1.1) NEMA17 17HS4401, передається через пасову передачу з посиленням ременем GT2 (С1.1), який закріплений вільними кінцями до каретки рельсової напрямної HIWIN MGN 12N (С2.3). Рух платформи забезпечується за допомогою штанг постійної довжини з карбону (С3.3) та пов'язаний з нею сферичними шарнірами (С4.2).

## **2.2. Агрегатно модульний принцип**

Залежно від функціонального призначення і конструктивного виконання побудови МПС здійснюється шляхом вибору необхідних модулів з наведених нижче комплекту: головного руху МГР; зміни довжина штанги МЗШ; примусовий обертальний рух шарнірів МПР; зміни координат опорних шарнірів МЗК; напрямних МН; паралелограмної штанги МПШ; штанги постійна довжина МПД; V-подібної механізм МВМ; нерухомий стаціонарний блок МСБ. В даній дипломній роботі за основу покладено саме розробку конструкції ТО на основі триглайда, але

виконувчим органом механізму, що проектується є нагрівальна головка з екструдером. Тож для конкретизації поставлених цілей, щодо проектування 3D-принтера, вводиться додатковий модуль, а саме нагріву та екструзії МНЕ.

Важливою умовою агрегатно-модульного принципу є побудова конкретних модулів і інших компонентів технологічного обладнання з паралельною кінематикою за функціональним призначенням і за вимогами споживачів в залежності від конкретних умов виробництва.

Основним критерієм ефективності проектування модулів є мінімізація їх маси і розмірів з метою зменшення матеріалоємності, збільшення характеристик міцності і динаміки.

Конкретні модифікації технологічного обладнання з паралельною кінематикою, які побудовані за агрегатно-модульним принципом, повинні відповідати таким вимогам:

- потужність, швидкість і прискорення рухів РО, а також точність позиціонування, жорсткість кінематичних ланцюгів, розміри робочого простору повинні відповідати комплексу технологічних завдань, які реалізуються на обладнанні;

Основным критерием эффективности проектирования модулей является минимизация их массы и размеров с целью уменьшения материалоемкости, увеличения характеристик прочности и динамики.

- кінематична структура і компоновка технологічного обладнання з паралельною кінематикою повинні забезпечити мінімальну кількість маніпуляційних рухів РО і необхідну кількість ступенів свободи для реалізації всіх технологічних операцій, які повинні на ньому проводитися;

- комплекс технологічних операцій, рівень їх інтеграції і темп виконання, а також енергетичні та фінансові витрати на впровадження нового технологічного обладнання повинні забезпечити техніко-економічну ефективність його експлуатації.

Кожен модуль технологічного обладнання з паралельною кінематикою має конкретне функціональне призначення.

Слід зазначити, що модулі зміни довжини штанг (МЗС), координат опорних шарнірів (МІК), примусового обертального руху опорних шарнірів (МІР) використовуються для реалізації рухів подач, установки і прискорених рухів виконавчих органів технологічного обладнання. Вони при аналогічному функціональному призначення мають різну кінематичну структуру і конструктивне виконання.

Модуль зміни довжини штанг (МЗД) застосовується в технологічному обладнанні з паралельною кінематикою типу гексапод, Біпод, трипод, в яких відповідний рух ВО реалізується шляхом зміни довжини штанг. Модуль складається з відповідного приводу лінійних переміщень (пневмо-, гідро- або лінійний електропривод) і штанг змінної довжини (наприклад, телескопічних), на кінцях яких змонтовані опорні шарніри.

Модуль напрямних (МН). Залежно від певних технологічних завдань, які реалізуються на технологічному обладнанні, що направляють мають різний конструктивне виконання і взаємне розташування в просторі. Використовується в технологічному обладнанні з паралельною кінематикою типу біглайд, триаглайд, гексаглайд. У технологічному обладнанні типу Біпод, трипод, гексапод модуль напрямних відсутній.

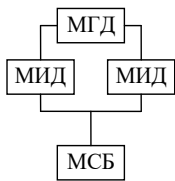
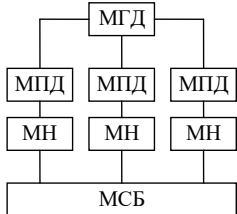
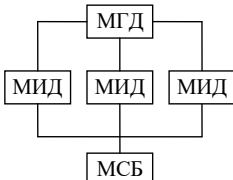
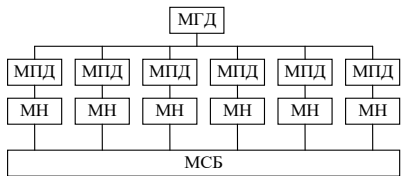
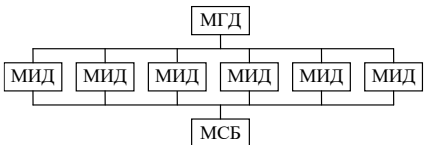
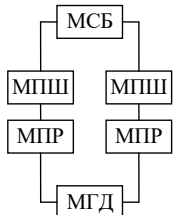
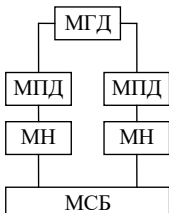
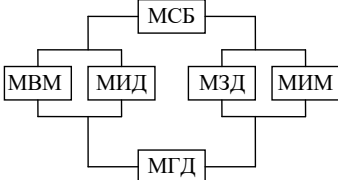
Модуль паралелограмна штанг (МПШ) використовується в технологічному обладнанні типу "дельта" і його модифікаціях. Модуль складається з двох пар кінематичних ланок, з'єднаних паралельно і побудованих у вигляді паралелограмної механізми.

Модуль штанг постійної довжини (МПД) має просту конструкцію і складається з стрижня, на кінцях якого змонтовані відповідні шарніри (сферичний або універсальний). Використовується в технологічному обладнанні з паралельною кінематикою типу біглайд, триаглайд, гексаглайд.

Модуль нерухомого стаціонарного блоку (МСБ) є основним і обов'язковим компонентом кожної модифікації технологічного обладнання з паралельною кінематикою, який виконує функції несучої системи і призначений для монтажу всіх його складових компонентів. Від цього модуля залежить конструювання технологічного обладнання.

Структурні схеми найбільш поширених типів технологічного обладнання з паралельною кінематикою наведені в табл. 2.6. Аналіз структурних схем технологічного обладнання з паралельною кінематикою показує, що все воно складається з певної кількості відповідних модулів. [1,5,10,19]

Таблиця 2.6

<i>Структурні схеми технологічного обладнання з паралельною кінематикою та набором модулів</i>					
№	Тип обладнання	Структурная схема	№	Тип оборудования	Структурная схема
1	Біпод		5	Триглайд	
2	Трипод		6	Гексглайд	
3	Гексапод		7	Дельта	
4	Біглайд		8	Ножиці	



Слід зазначити, що достатній і обов'язковий комплект модулів необхідно доповнити відповідними системами, які забезпечують сервісні умови функціонування технологічного обладнання, а саме системами: управління, контролю і діагностики, подачі мастильно-охолоджуючих засобів, видалення стружки, автоматичної заміни інструменту та іншими.

Для модульної побудови 3D-принтера що проектується необхідно ввести додаткові типи модулів. Зокрема у 3D-принтері відсутній як такий МГР, але присутній модуль подачі прутка (МПП) та модуль розігріву та екструзії (МРЕ), який змонтований безпосередньо на рухомому РО. Тоді, виходячи з морфологічного синтезу, та використовуючи ті модулі, з яких складається ТО з МПС, структурна схема механізму 3D-принтера, що має забезпечувати 3 лінійні координати буде мати вигляд як показано на рис 2.11.

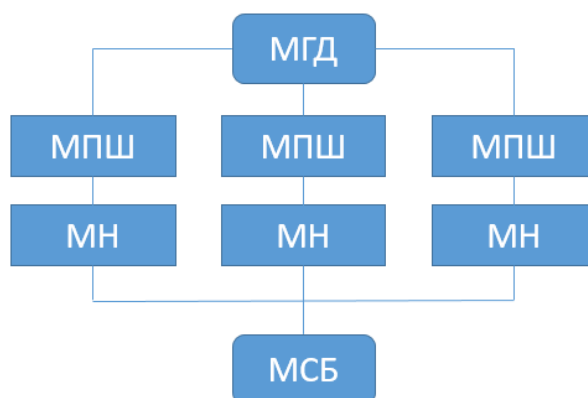
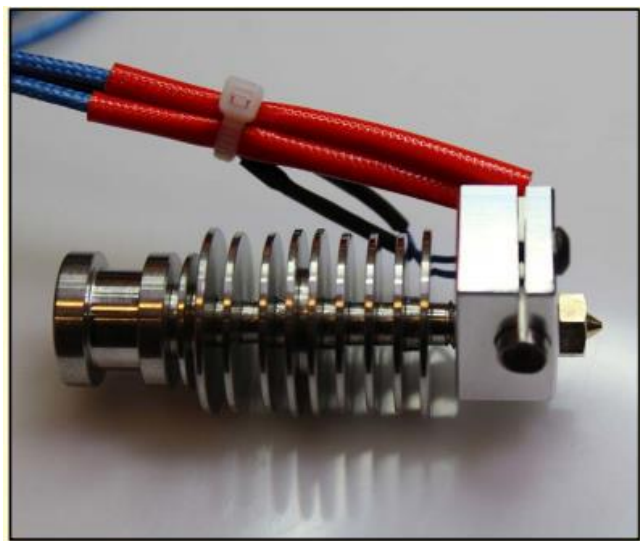


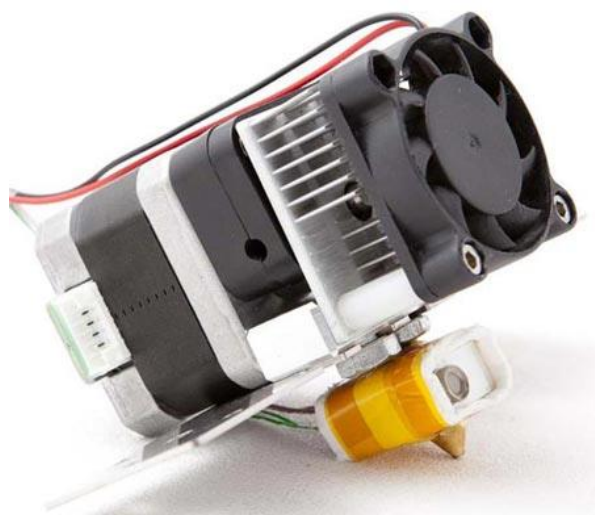
Рис. 2.11. Структурна схема 3D-принтера на основі триглайду, побудована за модульним принципом

Таким чином, МСБ – модуль станціонерного нерухомого блоку- це каркасна несуча система (креслення MB3117.ДПБ211.000). МН –модуль напрямних (креслення MB31-17. ДПБ 212.000), МШП –модуль штанг постійної довжини (креслення MB31-17. ДПБ 213.000), а МРЕ – це безпосередньо закуплений модуль розігріву та екструзії. Він має 2 основні конфігурації екструдер Боудена (рис 2.12 а,б) та звичайний (рис.2.12 с). Відмінність полягає у тому, що екструдер Боудена є рознесеним, тобто хотенд з'єднаний з модулем подачі не напряму, а за допомогою

тефлонової трубки. Це дозволяє розвантажити рухому платформу та уможливилює більші швидкості друку. Саме через це, в процесі морфологічного аналізу для 3D-принтера на основі тригладу, був обраний екструдер Боудена.



а)



б)

Рис. 2.12. Різні типи модулів розігріву та екструзії а – екструдер Боудена (рознесений), б – звичайний

Таким чином, з огляду на конкретні вимоги споживача і умови виробництва, можна сформувати будь-яке за функціональним призначенням технологічне обладнання з заданими функціональними і технологічними можливостями шляхом раціонального вибору комплекту складових модулів, який дозволить значно скоротити термін технічної підготовки і оперативно задовольнити вимоги сучасного ринку збуту верстатобудівної продукції.

## 2.3. Вибір та налаштування системи керування

### 2.3.1. Теоретичні аспекти числового програмного керування

Програмне управління (ПУ) на даний час набуло поширення в технічному обладнанні різного призначення. На зміну цикловому програмному управлінню (ЦПУ) прийшло числове програмне керування (ЧПК). По виду рухів виконавчих органів все різноманіття структур пристроїв з ЧПК можна поділити на дві групи: з постійною і змінною структурою. Основні види ЧПК показані на рис. 2.13 Розвиток обладнання з ПУ та покоління, можна побачити на табл. 2.7



Рис. 2.13. Основні види систем ЧПК

Таблиця 2.7

Еволюція поколінь ЧПК			
Покоління	Програма-носій	Базові елементи	Тип привода
I	Перфострічка	Резисторний напівпровідник	Електрогідравлічний кроковий привод
II	Паперова первострічка 8 доріжок, 7 біт	Інтегральні мікросхеми малого рівня інтеграції	<ul style="list-style-type: none"> <li>• кроковий електродвигун</li> <li>• двигун безрезисторним форсажем</li> </ul>
III	Первострічка 8 доріжок, 7 біт	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Інтегральні схеми середнього рівня інтеграції</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• кроковий електродвигун</li> <li>• слідкуючий двигун постійного струму</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• схемна реалізація алгоритмів керування</li> </ul>	
IV	Первострічка, задання програми з клавіатури і розміщення в електронному блоці пам'яті	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Інтегральні схеми і мікроЕОМ</li> <li>• Реалізація алгоритмів керування</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Слідкуючий теристорний і транзисторний двигун постійного струму</li> </ul>
V, VI	Первострічка, з клавіатури, магнітні і немагнітні засоби збереження інформації	Мультипроцесори	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Слідкуючий привод з двигуном постійного струму</li> <li>• Цифрові безколекторні двигуни постійного струму з кодовими датчиками</li> </ul>

У верстатах з МПС застосовують архітектурні системи ЧПК з інтерфейсом у вигляді персонального комп'ютера (ПК) з різним ядрами системи:

PCNC-1 - спеціальний процесорний модуль і одноплатний контролер автоматики;

PCNC- 2 - персональний комп'ютер і програмно реалізований контролер автоматики;

PCNC-3 - вбудований одноплатний комп'ютер і програмно реалізований контролер автоматики;

PCNC-4 - персональний комп'ютер і програмно реалізований контролер автоматики.

На основі співвідношення між «завданням ЧПК», «архітектурою системи ЧПК», «обчислювачем ЧПК» можна навести велику кількість реалізацій ЧПК до порівняно обмеженого набору типових рішень.

**Архітектурою системи ЧПК** називають склад, призначення та порядок взаємодії програмно-апаратних засобів, що залучаються для вирішення завдань ЧПК.

**Завдання ЧПК** - це проблемна частина системи ЧПК, пов'язана з виконанням однорідних функцій. Розробку системи ЧПК починають з ретельного формулювання завдань ЧПК, які в подальшому отримують архітектурну реалізацію.

Існує чотири завдання ЧПК

- геометрична;
- логічна;
- технологічна;
- термінальна.

**Геометрична задача** може бути визначена через фази послідовного перетворення геометричної інформації керуючої програми (введення керуючої програми в пам'ять пристрою ЧПК з семантичним і синтаксичним контролем, розрахунки еквідистанти, перетворення координатних систем, визначення параметрів, використовуваних в алгоритмі інтерполяції, необхідної для управління кожним окремим приводом і узгодження рухів приводів між собою).

**Логічна задача** полягає в автоматизації на верстаті різноманітних допоміжних операцій: затискачів-розтуляючі, підведень-відводів, перемикань, пусків-зупинок, зміни інструменту (це система циклової автоматики). Циклом автоматики верстата з ЧПК називають послідовність дій з трьох наступних слів кадру керуючої програми; «Швидкість головного руху» (S-функція); «Функція інструменту» (Т-функція); «Допоміжна функція» (М-функція).

**Технологічна задача** необхідна в тих випадках, коли основний робочий процес сам стає об'єктом управління з метою підтримки або оптимізації.

Термінальна задача служить джерелом потоку завдань для всіх інших завдань; причому ці завдання формуються під управлінням оператора верстата або ЕОМ більш високого рангу. Термінальна задача передається на термінал пристрою ЧПК у вигляді пульта оператора (універсальна консоль-пасивний термінал) або персонального комп'ютера (активний термінал).

Склад завдань ЧПК і міра їх складності мають безпосередній вплив на архітектуру пристрою ЧПК. Існує два протилежних радикальних архітектурних рішення: «розділяється обчислювач» і «виділяється обчислювач».

В даний час всі пристрої з ЧПК створюються тільки на основі мікроЕОМ, які дозволяють функцій вузлів цих пристроїв вирішувати програмним шляхом, що прискорює і здешевлює створення пристрою ЧПК різного призначення при мінімумі апаратурно-конструктивних модифікацій: три-чотири модифікації пристрою ЧПК дозволяє охопити досить велике число модифікацій за призначенням завдяки відповідному програмуванню завдань, що вирішуються мікроЕОМ, що входять в пристрої ЧПК.

При ускладненні завдань і збільшенні швидкодії верстатів часто застосовують кілька мікроЕОМ, кожна з яких вирішує болем узькій коло завдань.

### **2.3.2 Вибір модулів для числового програмного керування 3D-принтером**

В порівнянні з контролем металообробних верстатів ЧПК 3D-принтерів, має ряд певних відмінностей, пов'язаних з особливостями виконавчого органу та ішими вимогами до системи. В цілому ж основні підходи до налагодження системи керування дослідними зразками малагобаритного ТО є сталими. Так у даній роботі для контролю над Технічною системою «3D-принтер на основі триглайду» використовується наступне обладнання(табл.2.8):

Таблиця 2.8

## Основні складові системи керування та їх призначення


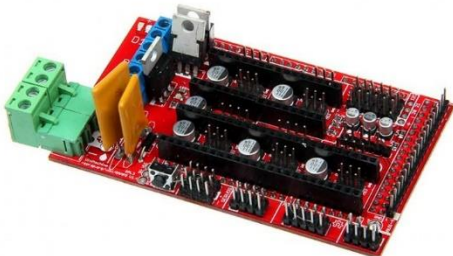

#	Назва	Призначення та характеристик	Зображення
	Плата мікроконтролера Arduino Mega 2560	Плата має 54 цифрових входів / виходів (14 з яких можуть використовуватися як виходи ШІМ), 16 аналогових входів, 4 послідовних портів UART, кварцовий генератор 16 МГц, USB конектор, роз'єм живлення, роз'єм ICSP і кнопку перезавантаження.	
	Шилд RAMPS 1.4	Плата являє собою Шилд (насадку) для контролера Arduino Mega, для керування 3D-принтером. для управління двигуном в мікро кроковому режимі. Плата включає в себе: Роз'єм для підключення драйверів крокових двигунів і контролю екструдера, роз'єми електроніки для легкого обслуговування і заміни частин, модернізації	
	Драйвер крокового двигуну A4998	Модуль драйвера на базі A4988 дозволяє управляти біполярним кроковим двигуном з струмом до 2А на обмотку. Драйвер має ряд відмінних рис: регульоване обмеження максимального струму, захист від перевантаження і п'ять режимів управління кроком (мікрошаг 1/2, 1/4, 1/8, 1/16)	

Схема підключення обладнання наведена на рис. 2.14

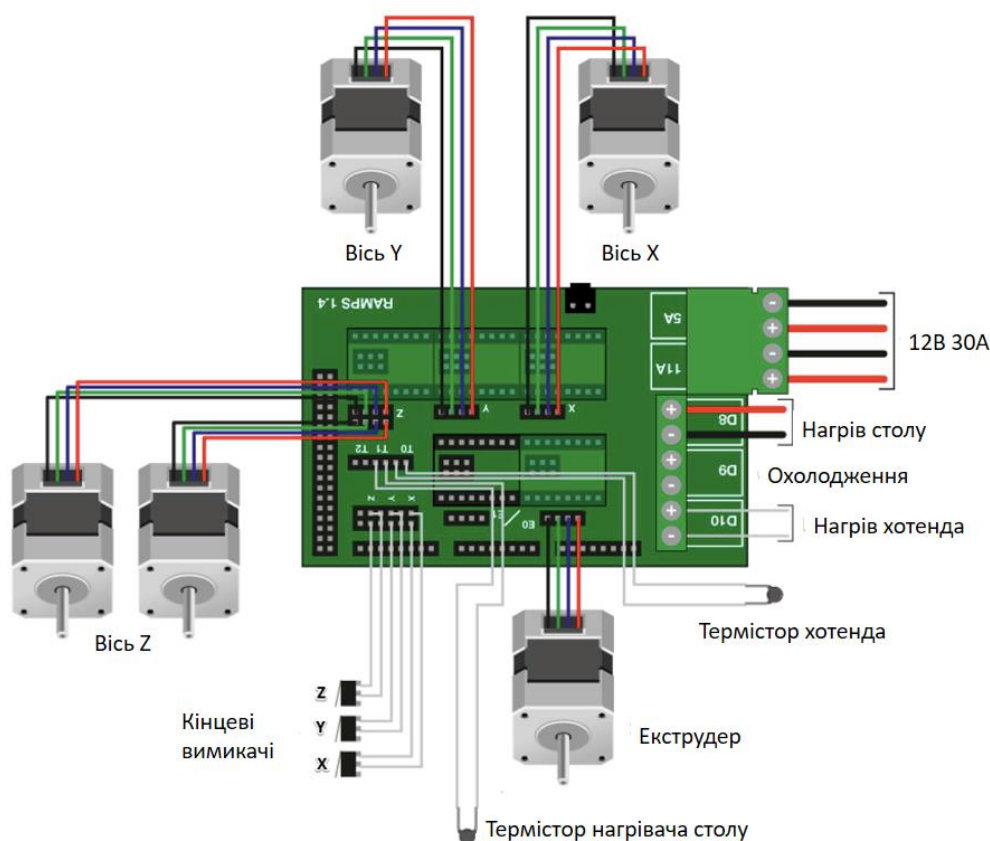


Рис. 2.14 Схема підключення електронних компонентів 3D-принтера до мікроконтролера Arduino Mega через шилд Ramps1.4

На рис.2.15 як приклад застосування системного методу розв'язання технічної задачі показано вибір датчику кінцевих переміщень. [3,4]. Позначимо кожний тип датчика через  $X_1, X_2 \dots X_n$ , побудуємо повний граф порівнянь (рис.2.15), а далі у декілька ітерацій складаємо матрицю суміжності (табл. 2.9). Після розрахунків, вже на перші ітерації порівняння отримуємо найкращий варіант для датчика кінцевих переміщень, а саме «1. Індуктивний датчик».



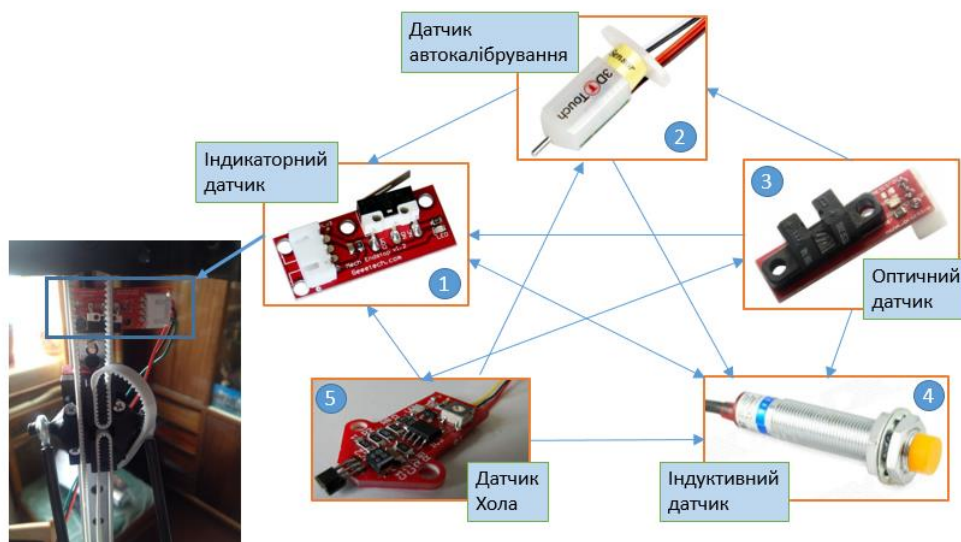


Рис.2.15 Апробація методу розставлення пріоритетів при виборі найоптимальнішого кінцевого перемикача (повний граф порівнянь)

Таблиця 2.9

						<i>I ітерація</i>		<i>II ітерація</i>		
	$X1$	$X2$	$X3$	$X4$	$X5$	$\sum a_i$	$P_i^{\text{відн}}(1)$	$P_i(2)$	$P_i^{\text{відн}}$	Місце
$X1$	1	2	2	2	2	9	0,36	41	0,47	I
$X2$	0	1	2	0	2	5	0,2	13	0,15	III
$X3$	0	0	1	0	1	2	0,08	4	0,04	IV
$X4$	0	2	2	1	2	7	0,28	25	0,28	II
$X5$	0	0	1	0	1	2	0,08	4	0,04	IV
$5^2 = 25$							1	87		

### 2.3.3 Порівняльний аналіз логіки програмування (формування G-коду) металорізальних верстатів та 3D-принтерів

Як вже було зазначено, за видом класифікаційною ознакою систем ЧПК.

Відповідно до цього можна виділити пристрої, що забезпечують:

**циклове управління** – траєкторія задається номерами точок у просторі;

**позиційне управління** – траєкторія задається номерами і координатами точок у просторі;

**контурне управління** – траєкторія задається просторовою кривою.

Багато сучасних пристроїв забезпечують усі три види задання траєкторії. Для об'єктів різних класів використовуються різні види задання траєкторій. Наприклад, для пристроїв ЧПК верстатів і роботів, використовуваних як основне технологічне

устаткування, переважне значення мають позиційне і контурне управління, а циклове управління використовується тільки при управлінні допоміжними механізмами. Для транспортно-складських систем і циклових робіт основним є циклове управління.

Характеристики привода подач верстата визначаються не тільки локальними зв'язками між окремими елементами привода, але в деякій мірі алгоритмом роботи пристрою ЧПК, і у свою чергу, впливають на побудову цього алгоритму.

Позиційні системи ЧПК забезпечують автоматичне переміщення робочого органу верстата на координату, задану програмою, без обробки в процесі переміщення робочого органу. Ці пристрої застосовують у свердлильно-розточувальних та інших верстатах.

Переміщення інструмента від однієї точки (координати) обробки до іншої виконується на прискорених ходах.

Специфічною для цього класу систем є вимога забезпечення точності тільки при зупинці в заданій координаті. Вид траєкторії при переміщенні з однієї координати в іншу не задається. Однак час переміщення повинен бути мінімальним.

Таким чином, метою позиційного управління є переміщення робочого органу в задані точки. При цьому ні траєкторія між точками, ні результуюча швидкість робочого органу не задаються для контролю.

З огляду на значний відсоток холостих ходів у верстатах з позиційними системами ЧПК, до привода подач висуваються вимоги високої швидкодії та забезпечення значних швидкостей переміщення при малій дискретності. У багатоцільових верстатах і ГВМ частка холостих ходів ще більше зростає через переміщення, виконувані при зміні інструмента. Операція позиціонування виконується також при інших видах управління верстатами. Тому в більшості випадків привод подач верстатів з ЧПК (крім інших вимог) повинен задовольняти також вимогам, що висуваються до цього привода в позиційних системах.

Контурні системи ЧПК забезпечують автоматичне переміщення робочого органу верстата по заданій траєкторії із заданою контурною швидкістю. Рух по заданій траєкторії здійснюється за допомогою інтерполяції, тобто розрахунку координат проміжних точок руху робочого органу в площині або в просторі.

Контурна швидкість – це результуюча швидкість подачі робочого органу вздовж осей координат об'єкта. У цих системах неузгодженість по швидкості і по напрямку від запланованих значень може призвести до порушення режимів обробки або до помилки обробки контурів деталей.

Існують наступні різновиди контурних систем ЧПК.

Контурні прямокутні (колінеарні) системи ЧПК застосовують у верстатах, у яких обробка проводиться лише при русі по одній координаті й оброблювана поверхня рівнобіжна (колінеарна) напрямним даної координати.

У 3D-принтерах використовують контурні системи числового управління, адже при переході від точки до точки формоутворюючої поверхні необхідно контролювати швидкість, в залежності від траєкторії, типу поверхні, та її розташування. В цьому сенсі керування 3D-принтером є складнішим, в порівнянні, наприклад, з фрезерним верстатом з 3-ма ступеням вільності за рахунок великої кількості різних типів контурів. Так, при фрезерній обробці, швидкість рухів РО є однаковою, та залежить від обраного режиму різання. При 3D-друці, для збільшення продуктивності, було реалізовано можливість обробки різних типів контурів з різною швидкістю. Тобто фасонні, зовнішні поверхні, завжди друкуються з меншою швидкістю, ніж, наприклад заповнення внутрішнього об'єму деталі, для забезпечення відповідної якості поверхні. Різні типи швидкостей при 3D-друці показані на рис. 2.16

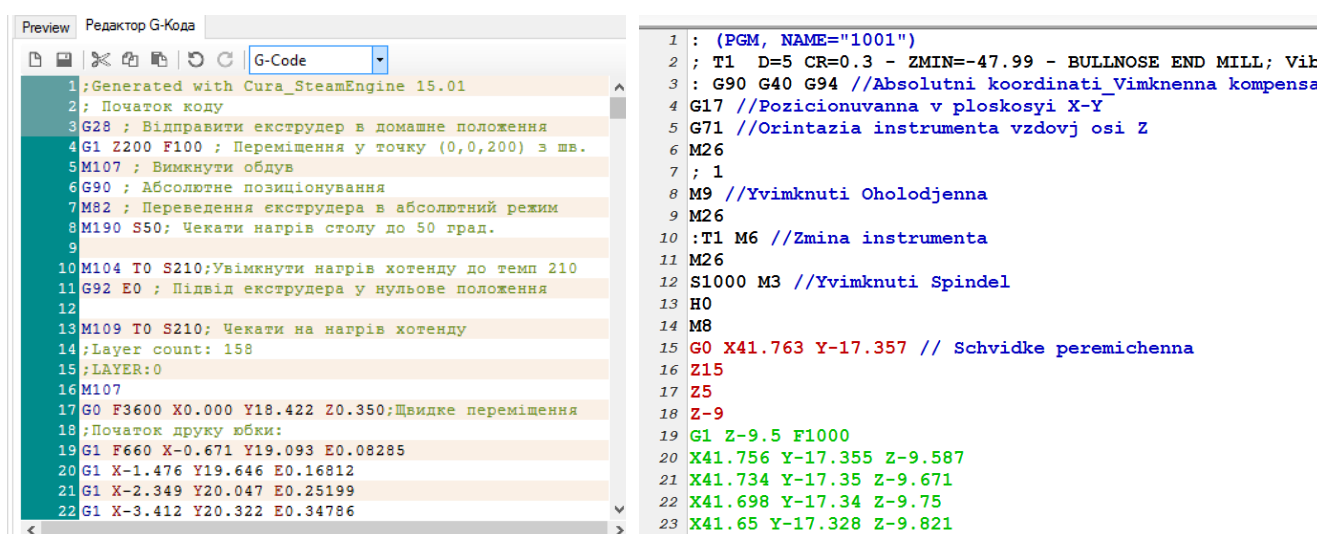
Скорость			
	Медленно	Быстро	
Печать:	<input type="text" value="40"/>	<input type="text" value="100"/>	[mm/s]
Перемещение:	<input type="text" value="40"/>	<input type="text" value="100"/>	[mm/s]
Первый слой:	<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="15"/>	[mm/s]
Внешний периметр	<input type="text" value="30"/>	<input type="text" value="60"/>	[mm/s]
Внутренний периметр	<input type="text" value="40"/>	<input type="text" value="80"/>	[mm/s]
Заполнение:	<input type="text" value="60"/>	<input type="text" value="100"/>	[mm/s]
Стиль заполнения:	<input type="text" value="30"/>	<input type="text" value="60"/>	[mm/s]

Рис. 2.16 Скріншот програми для контролю 3D-принтера Repetier-Host.

Діапазони швидкостей для різних типів контурів.

Таким чином, якщо для керування верстатом, G-код автоматично формується у САМ системі, то для друку деталі, G-код генерується спеціальною програмою – слайсером. Слайсер – це програма, схожа на САМ систему, що автоматично обробляє 3D-модель деталі у форматі \*.stl за заданими режимами друку та формує контур друку та відповідно G-код.

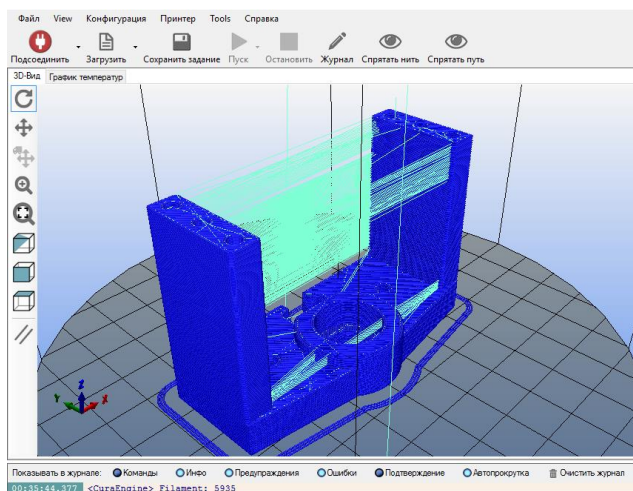
Далі, на основі порівнянь роботи CAD системи CAM Autodesk Inventor, та слайсер CURA. будуть викладені основні засади та приципи, на яких формується G-код для 3D-друку.



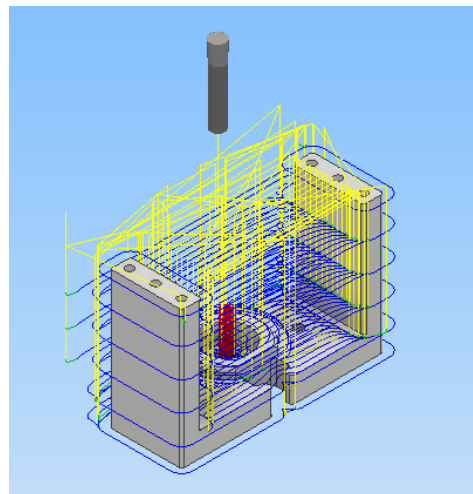
а)

б)

Рис. 2.17 Порівняльний аналіз формування стартового G-коду (шапки програми) для 3-охвимірного вирощування дателі –а, та чорнової фрезерної обробки – б.



а)



б)

Рис. 2.18. Приклади генерації слайсером CURA – а, та CAM Ineventor – б. формоутворюючих рухів виконавчих органів.

Важливою складовою в процесі 3D-друку є забезпечення стабільності заданої температури в хотенді. Для цього в системі керування введений зворотній зв'язок з можливістю ПІД-регулювання. Так температура нагрівача контролюється за допомогою термістора хотенда. Процес контролю за температурою у спеціальній програмі для управління 3D-принтером Repetier Host показано на рис. 2.19

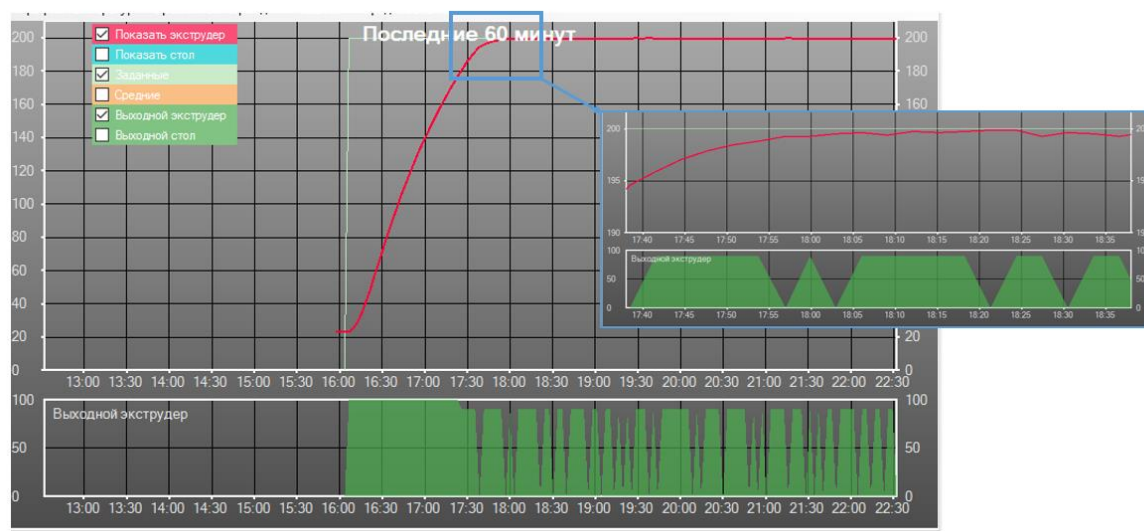


Рис.2. 19. Контроль температури у хотенді зі зворотнім зв'язком та PID регулюванням

Для відповідальних або складних деталей, програміст має сам скласти опимальний G код, адже автоматизований процес слайсингу припускає багато спрощень, та не завжди може розділяти, ти чи інші специфічні контури так на рис. 2.20 показано, як за допомогою різних слайсерів була роздрукована одна й та сама деталь

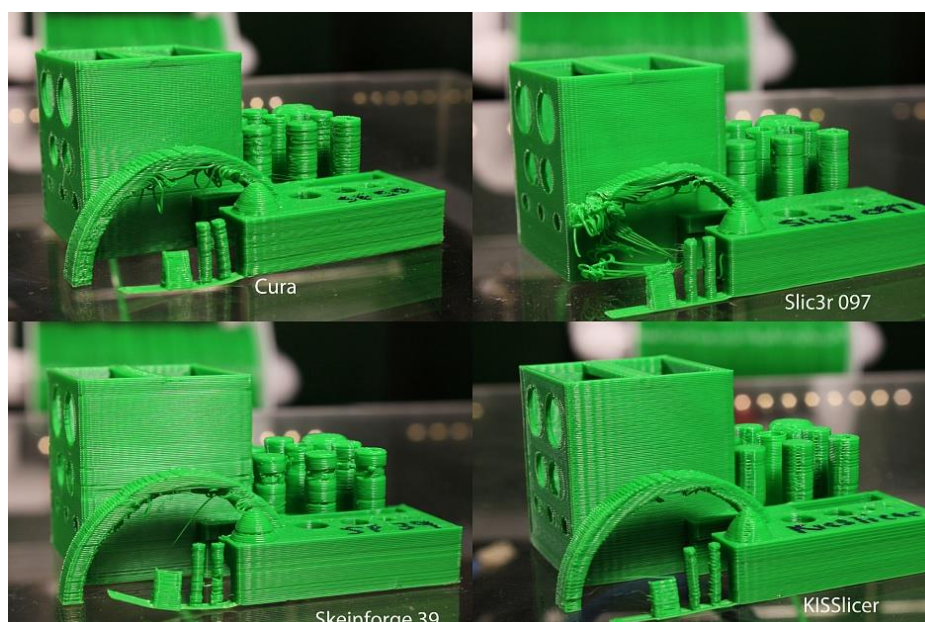


Рис. 2.20. Деталь вирошена на 3D-принтері, при одних й тих самих режимах за допомогою різних слайсерів.

## РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТВОРЕНОГО 3D-ПРИНТЕРА

### 3.1. Структурно-кінематичний аналіз 3D-принтеру на базі триглайду

В загальному вигляді в механізмах паралельної структури (МПС) можна виділити Вихідну ланку та Основу, які з'єднані деяким числом  $n$  кінематичних ланцюгів паралельно у сенсі передачі руху та зусиль. В кожному кінематичному ланцюзі встановлюється один або декілька приводів. Вихідна ланка являє собою робочий орган. МПС дозволяють забезпечувати до шести ступенів вільності вихідної ланки, що значно розширює технологічні можливості обладнання. На рис. 3.1. наведена загальна кінематична схема технологічного обладнання паралельної структури [5].

В МПС переміщення вихідної ланки (ВЛ), на якій може встановлюватися або заготовка, або інструмент, здійснюється декількома кінематичними ланцюгами. Кожна кінематична ланцюг - це ланки, з'єднані одна з одною зв'язками, які дозволяють здійснити вільне переміщення ланок і з'єднання, в яких встановлюються керуючі приводи. Паралельність роботи кінематичних ланцюгів полягає в тому, що кожен кінематична ланцюг повинен забезпечити переміщення ВЛ по керованим координатам і обмежувати її переміщення по некерованим.

Оскільки в МПС кінематичні ланцюги, що з'єднують основу з ВЛ, працюють паралельно, то в залежності від розташування їх початкових ланок на основі допустимих переміщень в кожному кінематичному ланцюзі. Крім того, можуть бути різними і типи з'єднань.

Кожний кінематичний ланцюг, що з'єднує ВЛ з основою, незалежно від інших ланцюгів можна розраховувати як механізм, який має задану кількість ступенів свободи. При цьому число ступенів свободи для кожної кінематичного ланцюга разом з приєднаною до нього ВЛ повинно бути не менше кількості ступенів свободи вихідної ланки. Дана умова є необхідною, але недостатньою для працездатності МПС [10,19].



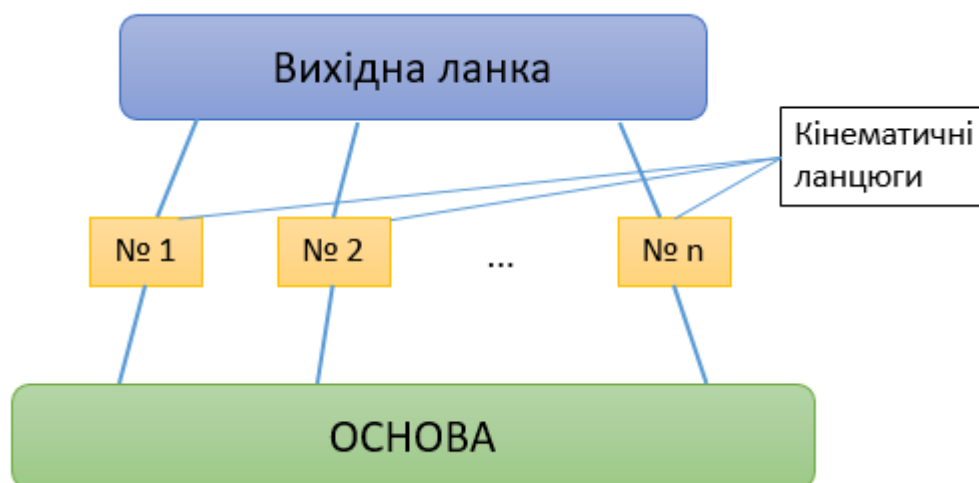


Рис. 3.1 Загальна кінематична схема механізму паралельної структури

### 3.1.1 Структурний аналіз і синтез працездатних рішень

Розглянемо схему 3D-принтера на основі триглайду, що був синтезований за допомогою морфологічного аналізу. Спираючись на схему (рис.3.1) в загальному виді основні зв'язки та ланки кінематичної схеми 3D-принтера, що проектується можна описати так: Вихідна ланка 1 поєднана з основою (колонами) 2 трьома кінематичними ланцюгами, що являють собою паралелограми з штангами постійної довжини 3. Кожний паралелограм пов'язаний з вихідною ланкою та основою сферичними шарнірами. Переміщуючи основи паралелограмів вздовж штанг, можна орієнтувати ВЛ у просторі.

Першим етапом кінематичного аналізу механізму є перевірка його ступенів рухомості та нерухомості. Даний аналіз дає уявлення про забезпечення працездатності механізму в цілому. Розглянемо кінематичну схему на рис. 3.2



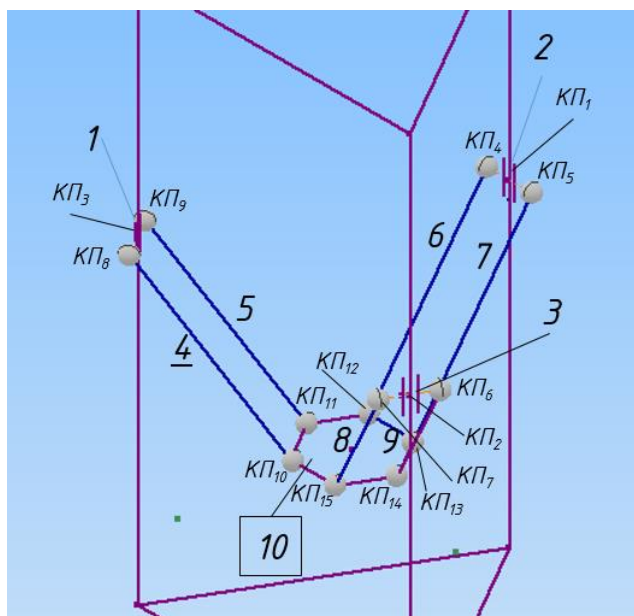


Рис.3.2. Кінематична схема 3D-принтера на основі триглайду

Число ступенів вільності механізму відносно нерухомого його елемента називається ступенем рухомості механізму, який для просторових механізмів визначається за формулою Малишева:

$$W_{CB} = 6n - 5P_5 - 4P_4 - 3P_3 - 2P_2 - P_1 \quad (3.1)$$

де  $n$  – кількість проміжних ланок ланцюга,  $(P_5 - P_1)$  – кількість рухомих пар.

Ступінь нерухомості механізму обчислюється за формулою:

$$W_{CH} = 6(n - n_b) - 5(P_5 - P_{5b}) - 4(P_4 - P_{4b}) - 3(P_3 - P_{3b}) - 2(P_2 - P_{2b}) - (P_1 - P_{1b}) \quad (3.2)$$

де  $n_b$  – кількість приводних ланок, а  $P_{5b} - P_{1b}$  – відповідно кількість приводів з ступенем рухомості від 1 до 5, відповідно.

Тоді умова працездатності механізму:

$$W > 0, W_H = 0 \quad (3.3)$$

Сформуємо таблицю вхідних даних для розрахунку по формулах (3.1) та 3.2 для кінематичної схеми, показані на рис 3.2

Таблиця 3.1

$n=10, \sum КП = 15, n_B = 3$									
Вар№	P5	P5B	P4	P4B	P3	P3B	W	WH	Висн.
1	3	3	0	0	12	0	<b>9</b>	<b>6</b>	-
2	3	3	12	0	0	0	<b>-3</b>	<b>-6</b>	-

Перебір основних варіантів зав'язків показав, що механізм є не працюєдатним, але, використовуючи можливості CAD Autodesk Inventor, при проектуванні 3D-принтера на основі триглайду були відтворені кінематичні пари, що відповідають вар.1 (табл 3.1) та подальший аналіз показав, що  $W = 3$ . (рис. 3.3)

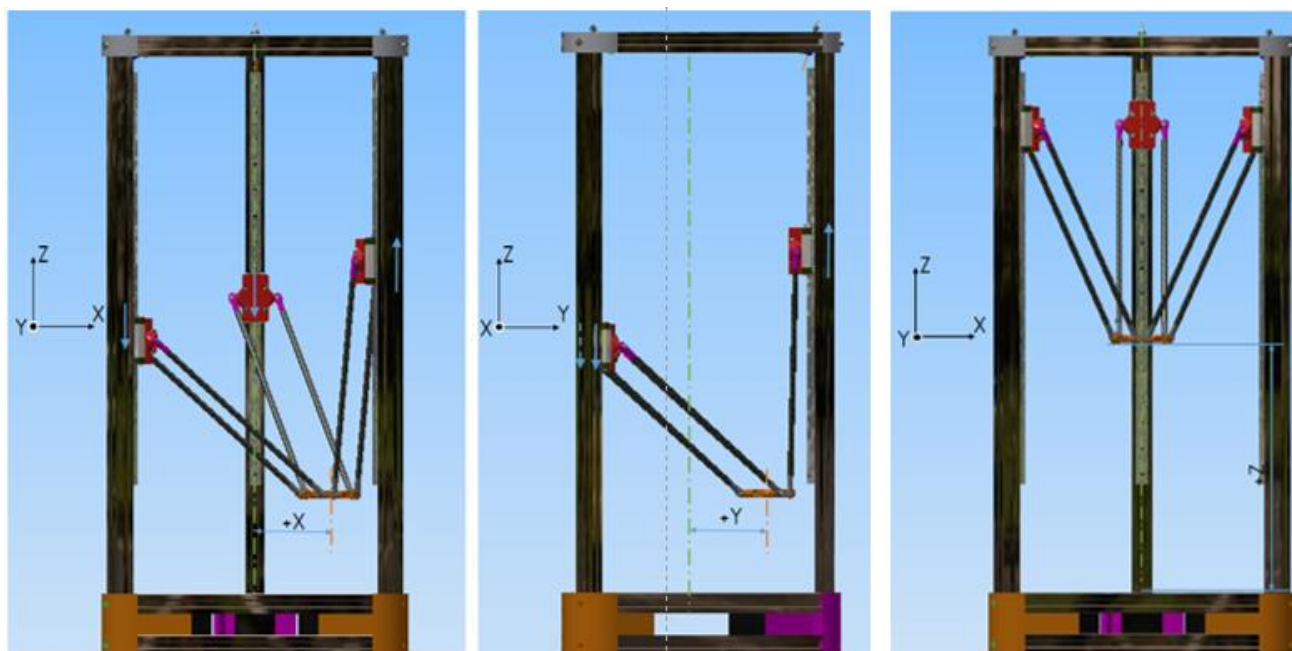


Рис 3.3. Аналіз рухомостей механізму на базі триглайду з використанням можливостей Autodesk Inventor

Такий аналіз, дозволяє зробити висновок, що методика оцінки та структурного аналізу викладеного у відповідній літературі не завжди дає вірний результат. Аналіз обладнання з МПС потребує розробки додаткових методик та алгоритмів. Так для остаточної перевірки рухомостей механізму, кінематичну схему було спрощено наступним чином. Модуль паралельних штанг було зведено до однієї штанги постійної довжини. Тоді КП, що відповідали попарним

сферичним шарнірам зведуться до однієї кінематичної пари. Аналіз спрощеної схеми (рис.3.5) показаний у табл. 3.2)

Таблиця 3.2

$\sum \text{КП} = 9, n_{\text{зв}} = 8, n = 7, n_8 = 3$									
Вар№	P5	P5B	P4	P4B	P3	P3B	W	WH	Висн.
1	6	3	0	0	3	0	3	0	+
2	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	+
3	3	3	3	0	3	0	6	21	-

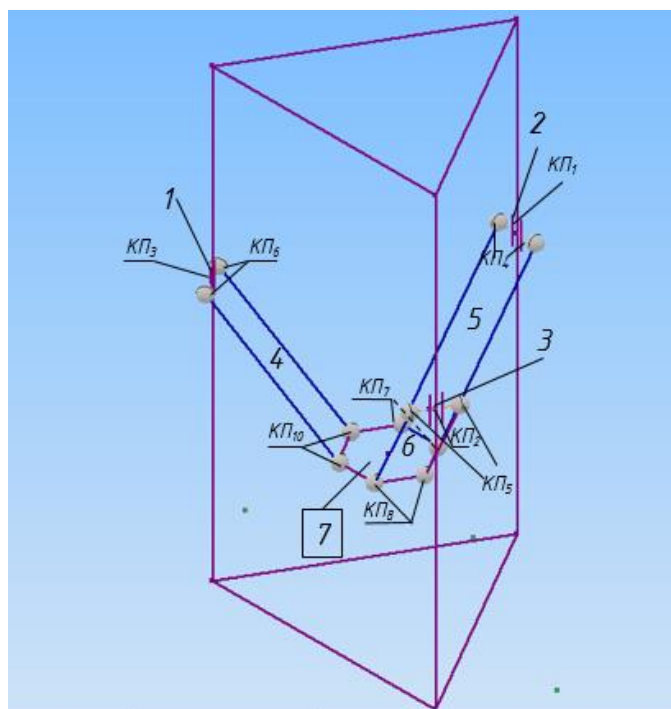


Рис. 3.4. Спрощена кінематична схема

Таким чином, за декілька ітерацій було встановлено, що механізм при використанні штанг постійної довжини та сферичних шарнірів є працездатним

### 3.1.2. Вирішення прямої задачі кінематики графо-аналітичним методом

Основні задачі кінематичного аналізу сформульовані наступним чином:

1. Визначення траєкторій руху вихідної ланки за заданими законам руху приводів (*пряма задача кінематики*)

2. Визначення законів переміщення керованих координат приводів, що забезпечують необхідний закон переміщення вихідної ланки механізму

3. Визначення швидкості ВЛ по заданим швидкостям керованих приводних координат, а також рішення оберненої задачі, тобто визначення швидкостей керованих координат, що забезпечують задані швидкості вихідної ланки;

4. Рішення лінійних рівнянь для розрахунку управління виконавчими приводами забезпечення заданого закону переміщення вихідної ланки.

Проектування 3D-принтера на основі триглайду вимагає формалізації зв'язків між компонентами системи для математичного опису з подальшим візуальним моделюванням, оцінкою очікуваних технічних характеристик, визначення оптимальних значень показників і проектування запропонованих верстатів. Для отримання математичних залежностей між координатами характерних точок кінематичних ланцюгів



Рис. 3.5. Операції, пов'язані з кінематичним аналізом при проектуванні 3D-принтера

Для вирішення прямої задачі кінематики про положення робочого органу 3D-принтера на основі триглайду введемо наступні позначення (табл. 3.3)

Таблиця 3.3

Параметри для кінематичного аналізу та керуванням 3D-принтером

Позначення та розміри на схемах та формулах	Пояснення	Назва параметру в керуючій програмі	Фактичне значення розміру досліджуваного 3D-принтера (мм)
$x, y, z$	Координати положення ВЛ		
$A, B, C$	Умовне позначення колон принтера		
$A_1, B_1, C_1$	Умовні точки, розташовані на платформі робочого органу		
$A_2, B_2, C_2$	Умовні точки, розташовані на каретках принтера		
$z_{max}$	Висота робочого простору вздовж координати $Z$	Z_MAX_LENT H	251
$t$	Точка, розташована на робочому органі		
$l$	Довжина штанги	DIAGONAL_R OD_LENGTH	217

$p_0$	Відстань від центра шарніра штанги до осі робочого органу (ефектора)	DELTA_EFFECTOR_OFFSET	50
$a_0$	Відстань від умовної вертикалі, яка проходить через шарнір штанги з'єднаного з кареткою до	HORIZONTAL_RADIUS_WHEN_CENTERED	96*
$\alpha, \beta, \gamma$	Відстань до кінцевого вимикача до каретки у «домашньому положенні)	TOWER_CARRIAGE_POSITION_OFFSETS	По замовченню 0
$i$	Індекс, що присвоюють параметрам, що будуть змінені після калібрування		

Визначимо положення точок:

$$\begin{vmatrix} A_1(a_{1x}, a_{1y}, a_{1z}) \\ B_1(b_{1x}, b_{1y}, b_{1z}) \\ C_1(c_{1x}, c_{1y}, c_{1z}) \end{vmatrix} \quad (3.4)$$

$A_1, B_1, C_1$ , у системі координат, пов'язаній з основою принтера. Для цього розглянемо схему показану на рис.3.6

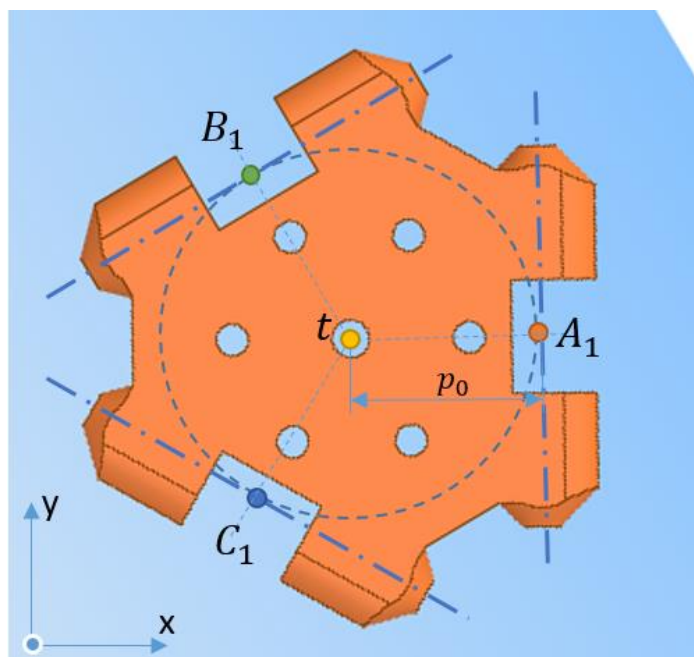


Рис. 3.6 Схема платформи для кінематичного аналізу

Зведемо у таблицю 3.4 математичні залежності для опису положення точок  $A_1, B_1, C_1$

Таблиця 3.4

$A_1$	$B_1$	$C_1$
$a_{1x} = t_x + p_0$	$b_{1x} = t_x + p_0 \cdot \cos(120^\circ)$	$c_{1x} = t_x + p_0 \cdot \cos(240^\circ)$
$a_{1y} = t_y$	$b_{1y} = t_y + p_0 \cdot \sin(120^\circ)$	$c_{1y} = t_y + p_0 \cdot \sin(240^\circ)$
$a_{1z} = t_z + t_0$	$b_{1z} = t_z + t_0$	$c_{1z} = t_z + t_0$

Задаємо математичну залежність між точками на платформі  $A_1, B_1, C_1$  та відповідними точкам на каретках

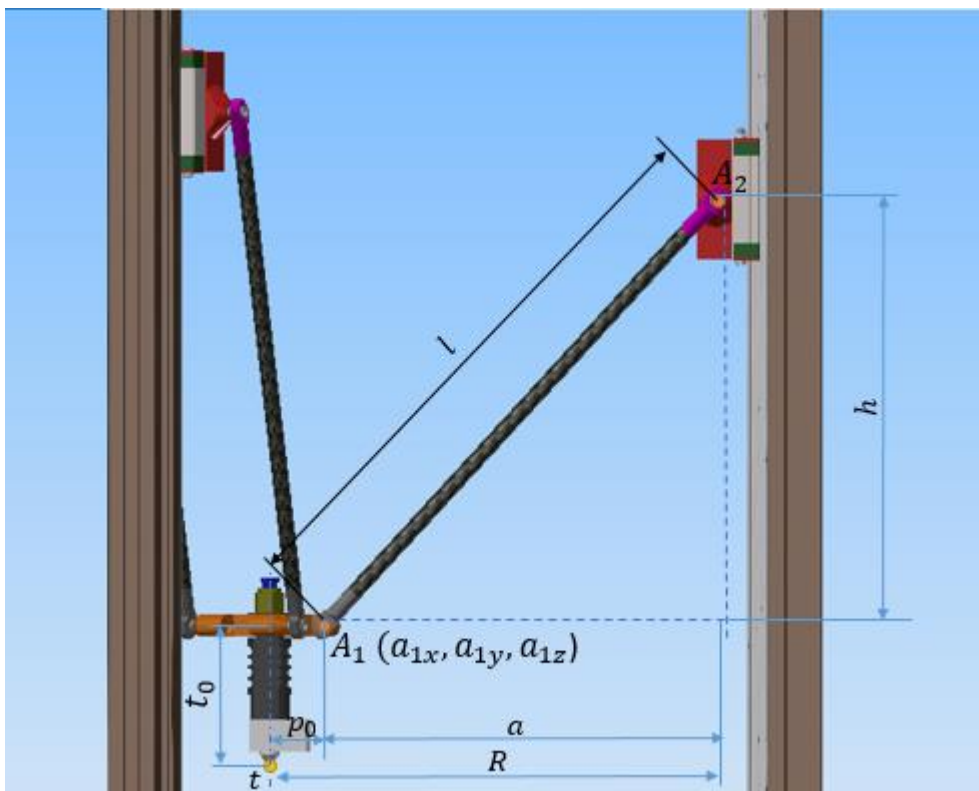


Рис.3.7. Опорна кінематична схема

$$\begin{vmatrix} A_2 (a_{2x}, a_{2y}, a_{2z}) \\ B_2 (b_{2x}, b_{2y}, b_{2z}) \\ C_2 (c_{2x}, c_{2y}, c_{2z}) \end{vmatrix} \quad (3.5)$$

Координати  $x$  та  $y$  для точок  $A_2, B_2, C_2$  в системі координат пов'язаній з основою принтера є відомими та постійними величинами. Зміна координати  $z$  відповідає переміщенню каретки вздовж напрямних. Сформуємо таблицю (табл. 3.5)

Таблиця 3.5

$A_2$	$B_2$	$C_2$
$a_{2x} = R_0$	$b_{2x} = R_0 \cdot \cos(120^\circ)$	$c_{2x} = R_0 \cdot \cos(240^\circ)$
$a_{2y} = 0$	$b_{2y} = R_0 \cdot \sin(120^\circ)$	$c_{2y} = R_0 \cdot \sin(240^\circ)$
$a_{2z} = ?$	$b_{2z} = ?$	$c_{2z} = ?$

Знайдемо рівняння, якими описується зміна відстані від платформи до колон у площині  $x-y$ , опорною є схема, зображена на рис. 3.8:



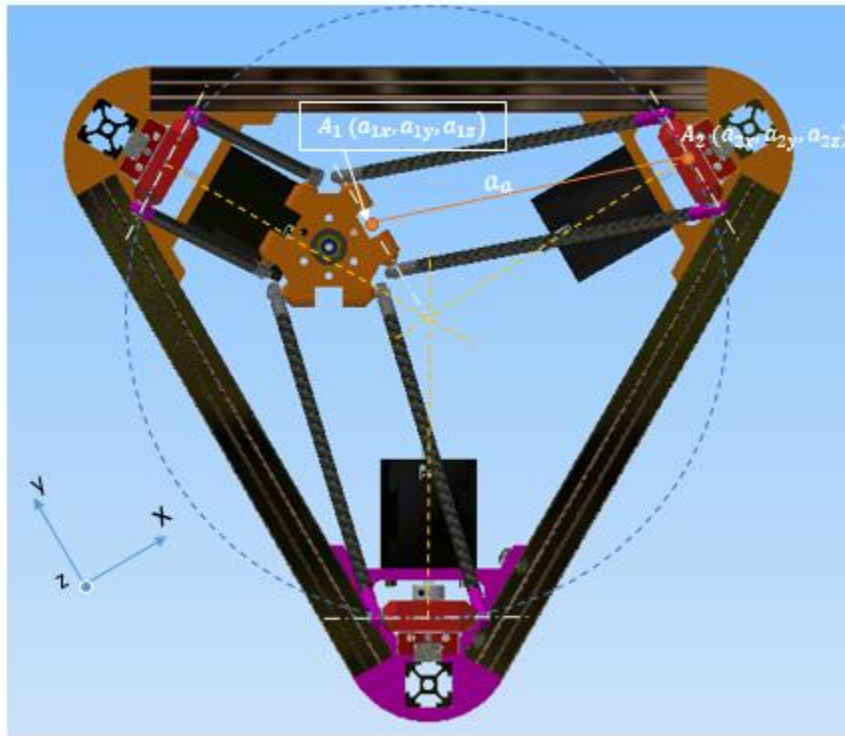


Рис. 3.8. Опорна схема, вид зверху

$$\begin{cases} a_a = \sqrt{(a_{2x} - a_{1x})^2 + (a_{2y} - a_{1y})^2} \\ a_b = \sqrt{(b_{2x} - b_{1x})^2 + (b_{2y} - b_{1y})^2} \\ a_c = \sqrt{(c_{2x} - c_{1x})^2 + (c_{2y} - c_{1y})^2} \end{cases} \quad (3.6)$$

Розрахуємо зміну відстані від платформи до каретки вздовж координати z:

$$\begin{cases} h_a = \sqrt{l^2 - a_a^2} \\ h_b = \sqrt{l^2 + a_b^2} \\ h_c = \sqrt{l^2 + a_c^2} \end{cases} \quad (3.7)$$

Таким чином, шукані величини переміщень кареток вздовж напрямних в залежності від зміни положення робочого органу можна знайти за формулою (рішення оберненої задачі кінематики):

$$\begin{cases} a_{2z} = t_z + t_0 + h_a \\ b_{2z} = t_z + t_0 + h_b \\ c_{2z} = t_z + t_0 + h_c \end{cases} \quad (3.8)$$

,або підставивши у (3.8) формули (3.6) та (3.7), отримаємо:

$$\begin{cases} a_{2z} = t_z + t_0 + \sqrt{l^2 - (a_{2x} - a_{1x})^2 + (a_{2y} - a_{1y})^2} \\ b_{2z} = t_z + t_0 + \sqrt{l^2 + (b_{2x} - b_{1x})^2 + (b_{2y} - b_{1y})^2} \\ c_{2z} = t_z + t_0 + \sqrt{l^2 + (c_{2x} - c_{1x})^2 + (c_{2y} - c_{1y})^2} \end{cases} \quad (3.9)$$

Зведемо систему рівнянь (3.9) до вигляду:

$$\begin{cases} a_{2z} = f(t_x; t_y; t_z) \\ b_{2z} = f(t_x; t_y; t_z) \\ c_{2z} = f(t_x; t_y; t_z) \end{cases} \quad (3.10)$$

$$\begin{cases} a_{2z} = t_z + t_0 + \sqrt{l^2 - (R_0 - (t_x + p_0))^2 + t_y^2} \\ b_{2z} = t_z + t_0 + \sqrt{l^2 + (R_0 \cdot \cos(120^\circ) - (t_x + p_0 \cdot \cos(120^\circ)))^2 + (R_0 \cdot \sin(120^\circ) - (t_y + p_0 \cdot \sin(120^\circ)))^2} \\ c_{2z} = t_z + t_0 + \sqrt{l^2 + (R_0 \cdot \cos(240^\circ) - (t_x + p_0 \cdot \cos(240^\circ)))^2 + (R_0 \cdot \sin(240^\circ) - (t_y + p_0 \cdot \sin(240^\circ)))^2} \end{cases} \quad (3.11)$$

Таким чином була отримана залежність (3.11), яка покладена в основу керуючої програми та буде використана для подальшого аналізу.

### 3.1.3. Використання САПР MATHCAD для аналізу 3D-принтера на основі триглайду.

На сьогоднішній день для математичного моделювання кінематики механізмів застосовується системи автоматизованого проектування. Подальші розрах

Так було написано програму в САПР Mathcad, за допомогою якої можна записувати анімації руху принтера за заданою траєкторією, будувати та аналізувати кінематичні характеристики ланок. Так на рис. 3.9 наведено графіки швидкості, переміщення та прискорення кареток принтеру при проходженні робочого органу спіралі Архімеда. Ця траєкторія є типовою для 3D-друку, адже всі колові контури заповнюються по спіралі.

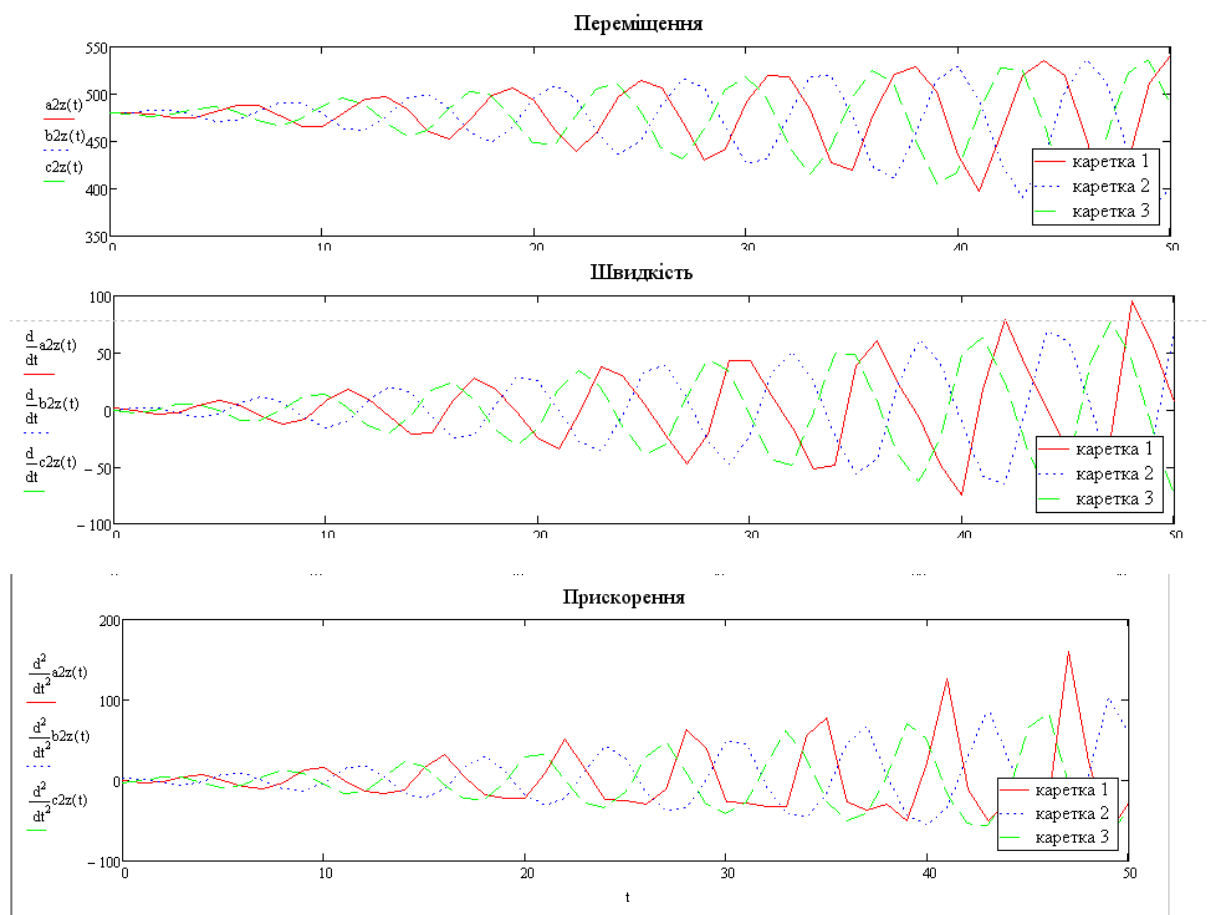


Рис. 3.9 Аналіз кінематичних характеристик при заданій траєкторії руху робочого органу

Вирішення прямої задачі кінематики. Слід знайти співвідношення, які описують, як змінюється положення РО в системі координат, в залежності від переміщень кареток вздовж відповідних штанг

Математично вирішення прямої задачі кінематики, можна звести до знаходження наступної системи співвідношень:

$$\begin{cases} t_x = f(a_{2z}; b_{2z}; c_{2z}) \\ t_y = f(a_{2z}; b_{2z}; c_{2z}) \\ t_z = f(a_{2z}; b_{2z}; c_{2z}) \end{cases} \quad (3.12)$$

Складність вирішення прямої задачі кінематики, полягає в тому що при вирішенні даної задачі виникає математична невизначеність. Тобто Вихід в позицію РО з координатами  $(t_x, t_y, t_z)$  можна досягти більше як одним способом, тобто за різною траєкторією. Тому дана задача вирішується програмно на основі рівнянь, що були знайдені при вирішенні зворотної задачі.

### **3.2. Аналіз похибок позиціонування та розробка методів їх усунення**

#### **3.2.1. Розробка та апробація алгоритмів для автокалібрування 3D-принтера на основі триглайду**

Внаслідок похибок складання вузлів, неточності самих деталей, виникають певні перекоси та відхилення від розмірів закладених у керуючій програмі. Таким чином реальні переміщення РО відрізняються від скерованих. На верстаті та 3D-принтері з МПК це у значній мірі відображається на виготовленій деталі. Тому слід вживати певних мір, які б мінімізували ці похибки на вже відкаліброваному обладнанні. Основною складністю та відміною у калібруванні обладнання з МПК на відміну від традиційного обладнання є те що всі вхідні та вихідні параметри системи є пов'язаними між собою. Тобто якщо при калібруванні традиційного, наприклад ортогонального ТО виявлена певна похибка, пов'язана з переміщенням вздовж певної координати, то вона усувається безпосередньо впливом (програмним, або конструкторським) на той кінематичний ланцюг, який забезпечує переміщення вздовж цієї ж координати. То при налагодженні точності переміщень ТО з МПК не можливо однозначно визначити, який параметр у механізмі або у математичній моделі «відповідає» за цю похибку. Але, цей, на перший погляд, недолік ТО з МПК є і його безпосередньою перевагою. Так, наприклад, в 3D-принтері на основі триглайду РО має 3 лінійні ступені вільності вздовж координат  $X, Y, Z$ . Якщо у такому обладнанні виникає похибка, то усунення похибки вздовж однієї координати дасть налаштування точності всієї системи. Тож в ТО з МПК діє принцип не роз'ємності цілого! У даній роботі розробляється метод калібрування та автокалібрування координати переміщення РО  $z$  відносно нерухомого столу. Далі будуть наведені похибки, що пов'язані з похибками переміщень вздовж цієї координати.

Калібрування як процес передбачає введення деяких параметрів в математичну модель, які в подальшому будуть змінені, так щоб похибки позиціонування системи були найменшими. В цій частині роботи описується налаштування паралельного переміщення робочого органу вздовж стола. Тобто відстеження похибки відбувається наступним чином. Розглянемо експлуатаційну

частину алгоритму калібрування (рис.3.10). Нехай в нульовій точці площини X-Y відхилення по Z буде нульовим. Перемістимо за допомогою панелі керування робочий орган в одну з досліджуваних точок площини X-Y  $n_i$ . Нехай в цій точці присутня похибка по осі Z, тоді її можна проілюструвати, як показано на рис.3.10

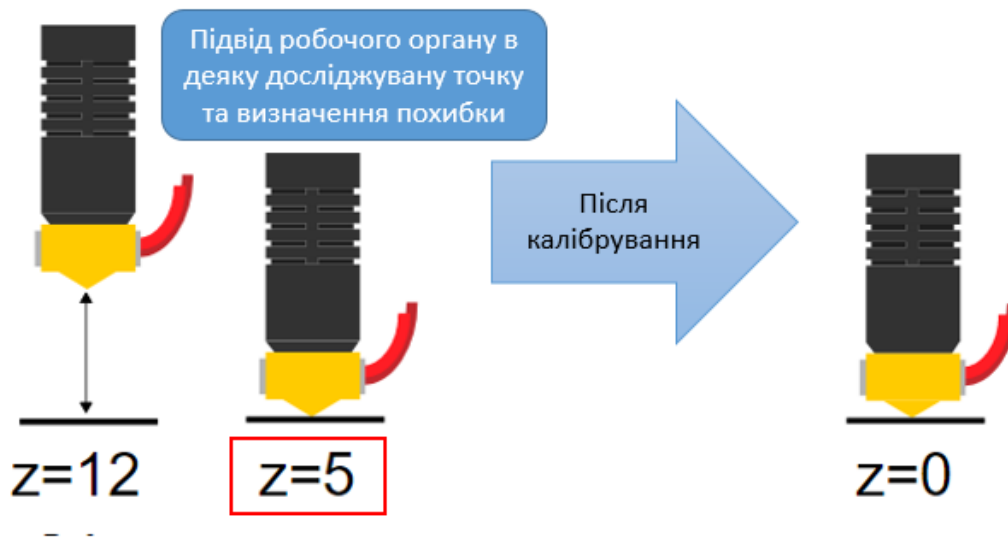


Рис. 3.10 Ілюстрація похибки в деякій досліджуваній точці  $n_i$ .

Загальний алгоритм вирішення задачі про калібрування показаний на рис. 3.11 та рис.3.13. Так, на перших кроках (1,2) ми маємо знайти співвідношення, що описують переміщення РО та кареток у просторі та пов'язати їх між собою математично (див підрозділи 3.2.1 та 3.2.2). Далі ми маємо визначити переміщення РО вздовж координати, відносно якої визначаємо похибки, з введенням додаткових параметрів, які будуть корегуватися в процесі калібрування та будуть закладені в керуючій програмі (3). Такими додатковими параметрами є  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , що визначають відстань від кінцевого вимикача до каретки. Враховуючи їх, наприклад керуючі рівняння (вирішення прямої задачі) зміняться наступним чином:

$$\begin{aligned} a_{2z} &= t_z + t_0 + \sqrt{l^2 - ((a_{2x} + \alpha) - a_{1x})^2 + (a_{2y} - a_{1y})^2} \\ b_{2z} &= t_z + t_0 + \sqrt{l^2 + ((b_{2x} + \beta) - b_{1x})^2 + (b_{2y} - b_{1y})^2} \\ c_{2z} &= t_z + t_0 + \sqrt{l^2 + ((c_{2x} + \gamma) - c_{1x})^2 + (c_{2y} - c_{1y})^2} \end{aligned} \quad (3.13)$$



Рис.3.11 Послідовний алгоритм автокалібрування

Крок 4 це процес, який полягає в тому, що принтер за допомогою датчика відстежує похибки в кожній з досліджуваних точок  $n_i$ .  $m$  разів. Таким чином формується деяка матриця даних, що буде математично порівнянна з заданими значеннями. На цьому кроці важливим є саме чинник експлуатації. Тобто, навіть при правильно написаній програмі калібрування, оператор має виконати деякі дії, аби калібрування було вдалим. Так основні кроки, що пов'язані з наладкою ТО перед калібруванням показані на рис. 3.12.



Рис. 3.12 Алгоритм налаштування перед калібруванням

Далі (5, рис 3.11, рис 3.13) робоча програма має сформувати масив похибок і для правильності подальшої мінімізації відхилень звести їх у функцію (6).

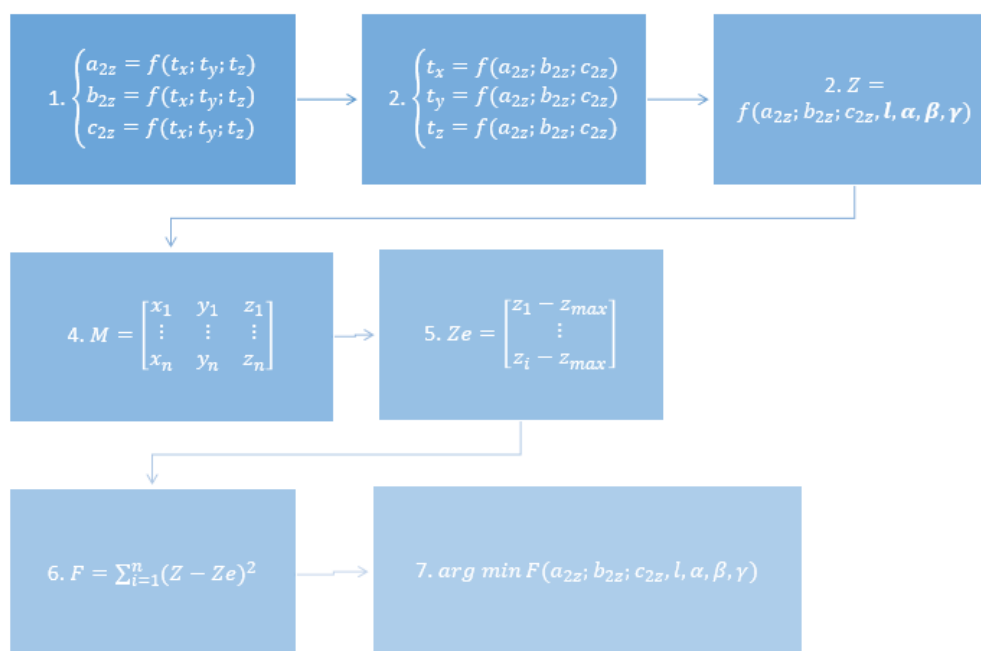


Рис. 3.13 Алгоритм автокалібрування

Після обробки отриманого масиву даних похибок найважливішим є правильно та максимально швидко досягти корекції параметрів. У запропонованій



методиці калібрування було вирішено використати для цього алгоритм Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно (BFGS) (англ. Broyden — Fletcher — Goldfarb — Shanno algorithm) [15,32,33], який являє собою ітераційний метод чисельної оптимізації, призначений для знаходження локального максимуму/мінімуму нелінійного функціоналу без обмежень. Даний метод знаходить мінімум будь якої двічі безперервно диференційованої опуклою функції. Незважаючи на ці теоретичні обмеження, як показує досвід, BFGS добре справляється і з неопуклими функціями.

Ідея алгоритму полягає в розкладі деякої функції  $f$  в поліном другого порядку

$$f(p + x_k) \approx f(x_k) + \nabla f^T(x_k)p + \frac{1}{2}p^T B_k p \quad (3.14)$$

,в поточній точці  $x_k$ , де  $B_k$  симетрична позитивно певна матриця (при наближених Гессіан - матриці других похідних), що оновлюється на кожній ітерації. Після чого знаходиться мінімум даної квадратичної задачі:

$$p_k = -B_k^{-1} \nabla f(x_k) \quad (3.15)$$

І знаходиться наступний крок:

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k p_k \quad (3.16)$$

, де  $\alpha_k$  задовольняє умові Вольфе:

$$f(x_k + \alpha_k p_k) \leq f(x_k) + c_1 \alpha_k p_k^T \nabla f(x_k) \quad c_1 \in (0,1) \quad (3.17)$$

$$p_k^T \nabla f(x_k + \alpha_k p_k) \geq c_2 p_k^T \nabla f(x_k) \quad c_1 \in (c_1, 1) \quad (3.18)$$

Замість того аби заново вираховувати  $B_k$  на кожній ітерації, к  $B_k$  додається матриця вимірювань на кожному кроці. Як програмний блок, алгоритм BFGS, показано на рис. 3.14 а, а графічний приклад агоритму на рис. 3.14 б.

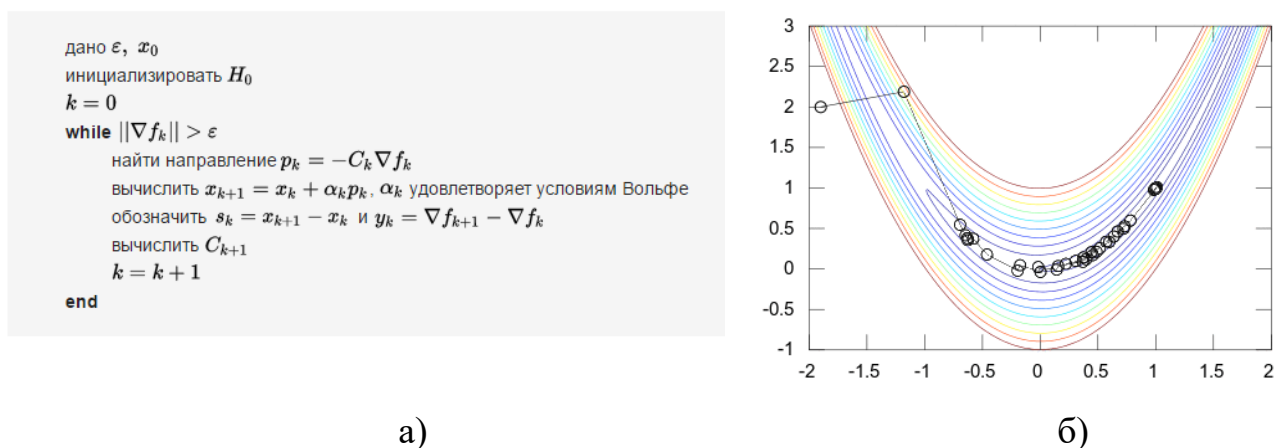


Рис. 3.14 Алгоритм Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно, а – програмний блок, б – ілюстрація роботи алгоритму на прикладі функції Розенброка (Банана-функція)

Аби перевірити правильність скомпільованого алгоритму, була розроблена програма на мові програмування Python, яка дозволяє вивести поле розсіювання похибок у вигляді графіка. (Додаток В). Основні результати калібрування показані на рис. 3.15

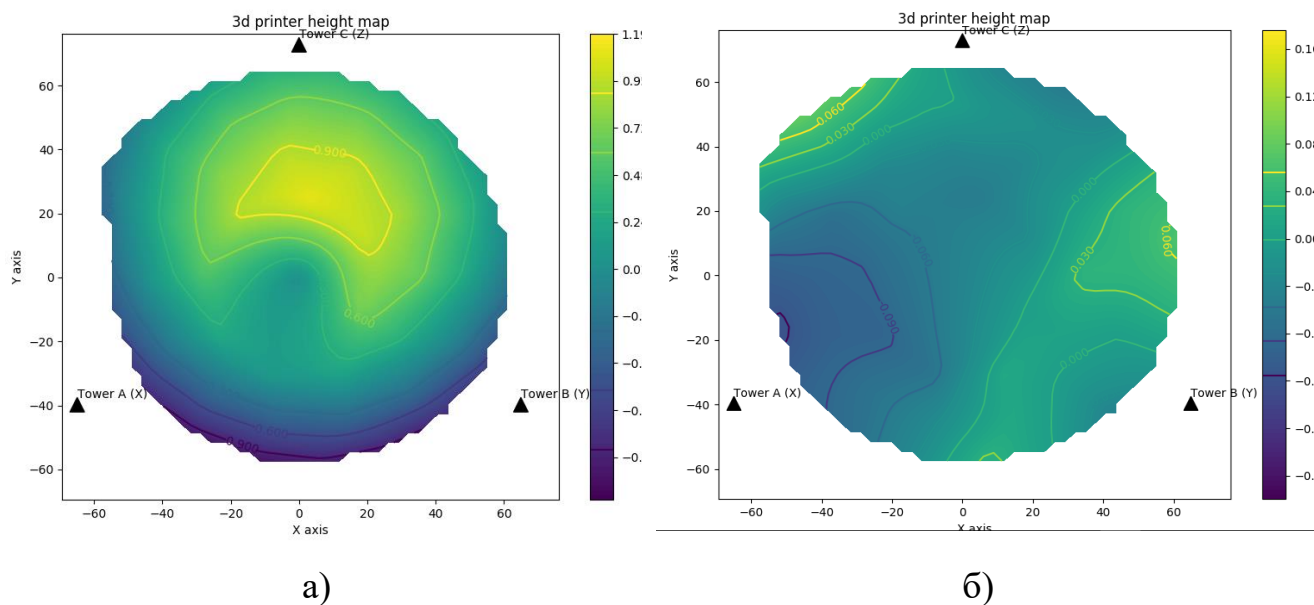


Рис. 3.15 Перевірка поля розсіювання похибок по координаті Z, а – до автокалібрування, б – після.

### 3.3. Динамічний аналіз

Об'єктом дослідження динаміки механізмів паралельної структури є математичний опис діючих на нього зусиль та моментів у вигляді рівнянь руху, іншими словами, створення та аналіз динамічної моделі з замкнутим кінематичним ланцюгом. Ці рівняння необхідні для вирішення прямої та оберненої задачі динаміки, синтезу законів керування та оцінки якості конструкції механізму.

В загальному випадку підготовка моделі динамічного розрахунку містить наступні роботи:

- спрощення складальної моделі;
- створення механічних з'єднань;
- визначення схеми навантаження елементів моделі.

Щоб прискорити процес моделювання і зробити його більш надійним, перед додаванням з'єднань і сил (в крайньому випадку після цього) необхідно виконати наступне:

- визначення особливостей збірки вузла та мети моделювання;
- визначення найбільш важливих (з точки зору динамічного аналізу) компонентів збірки.

#### 3.3.1. Деякі особливості динамічного моделювання у САПР Autodesk Inventor

Таки чином слід спростити готову збірку до моделі для аналізу. У середовищі Autodesk Inventor це легко можна зробити за допомогою команди «Подавить». На рис. 4.17 показана модель після спрощення, що повністю готова до динамічного моделювання.

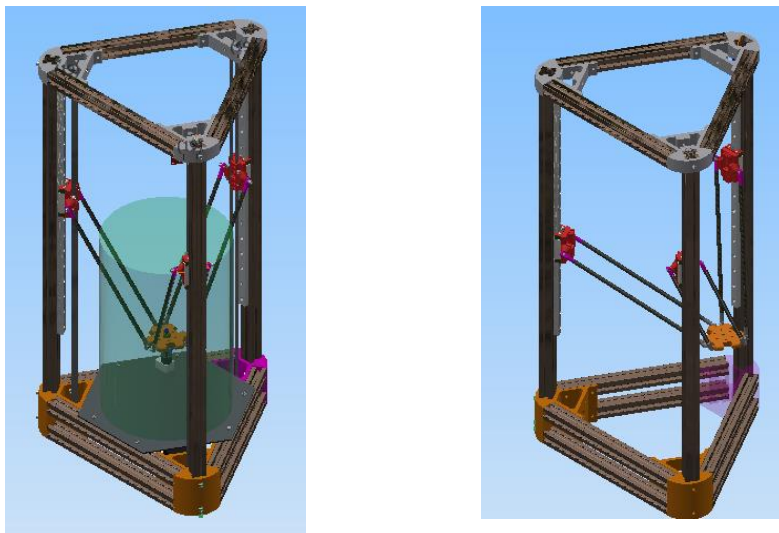


Рис.3.17 Модель 3D-принтера на основі триглайду до та після спрощення

За допомогою команди "Автоматическое преобразование зависимостей в стандартные соединения", включеної за умовчанням в діалоговому вікні "Параметры Динамическое моделирование" у вигляді прапорця з підписом "Автоматически преобразовывать зависимости в стандарт. соединения" (Програма автоматично перетворює складальні конструктивні зв'язки в стандартні з'єднання. З'єднання, що виконані за допомогою автоматичного перетворення, в подальшому можна відредагувати змінюючи напрямні вектори основної деталі та приєднаної.

Перевіримо правильність автоматичної генерації з'єднань у моделі за допомогою команди «Состояние модели» рис. 4.18

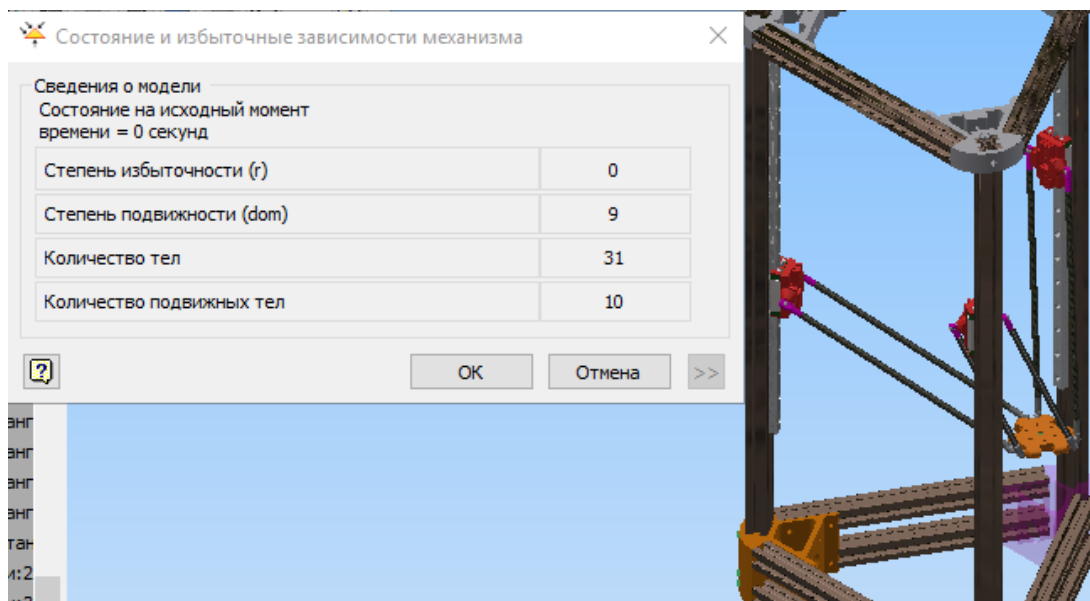


Рис. 3.18 Перевірка та структурний аналіз механізму в Autodesk Inventor

Як видно з рисунку, кількість ступеней рухомості дорівнює 9. Це є вірним значенням, адже 3 з них – це переміщення платформи (Див. Розділ 3 Структурний аналіз механізму) та 6 це надлишкові ступені вільності у штангах навколо власної осі, через використання не карданних шарнірів, а сферичних.

Таким чином після запуску динамічного моделювання було автоматично створено 6 сферичних з'єднань у шарнірах, з подальшою можливістю їх редагування (рис. 4.19, а) та 3 призматичні між рельсами та каретками . (рис. 4.20, б). Так на рис. 4.20 б. видно, що за початок системи координат , кожного елементу з'днання вибрано відповідні нижні площини деталей, ось Z направлена вгору, тобто співпадає з загальною СК верстата.

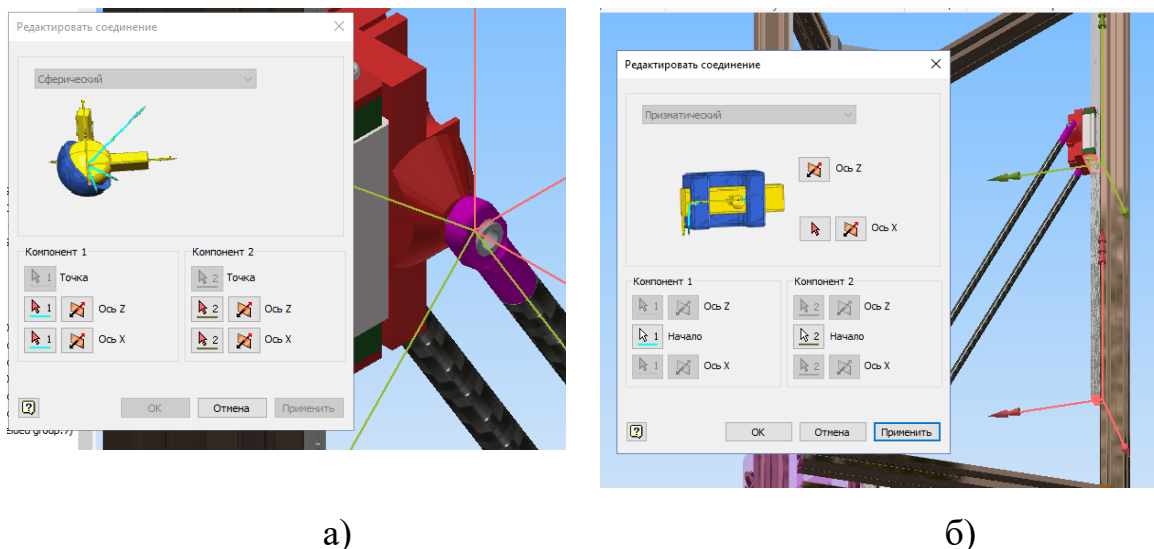


Рис. 3.19 Редагування автоматично згенерованих з'єднань, сферичних – а, та призматичних – б.

В модулі динамічного моделювання доступні типи кінематичних з'єднань, що реалізують всі існуючі класи кінематичних пар:

- стандартні з'єднання ("Вращение", "Призматическое", "Цилиндрическое", "Сферическое", "Плоское", "Точка - отрезок", "Отрезок - плоскость", "Точка - плоскость", "Пространственное", "Сварное");
- шарніри кочення ("Цилиндр на плоскости", "Цилиндр на цилиндре", "Цилиндр в цилиндре", "Цилиндр-кривая", "Ремень", "Конус на плоскости", "Конус на конусе", "Конус в конусе", "Винт", "Червячная передача");
- шарніри ковзання ("Цилиндр на плоскости", "Цилиндр на цилиндре", "Цилиндр в цилиндре", "Цилиндр-кривая", "Точка-кривая");
- 2D контактні з'єднання ("2D контакт");
- силові з'єднання ("Пружина / амортизатор / домкрат", "3D-контакт").

Типи стандартних з'єднань показані на рис. 4. \_\_

Далі налаштуємо властивості з'єднань за допомогою вкладки «Свойства соединения».

Для призматичних з'єднань приймемо наступні обмеження та налаштування. Для обмеження рухомості кареток вздовж рельс, задамо налаштування мінімального та максимального положення, так аби положення робочого органу в

цих екстремумах відповідало мінімуму та максимуму у точках робочого простору по осі Z (рис. 4.21).

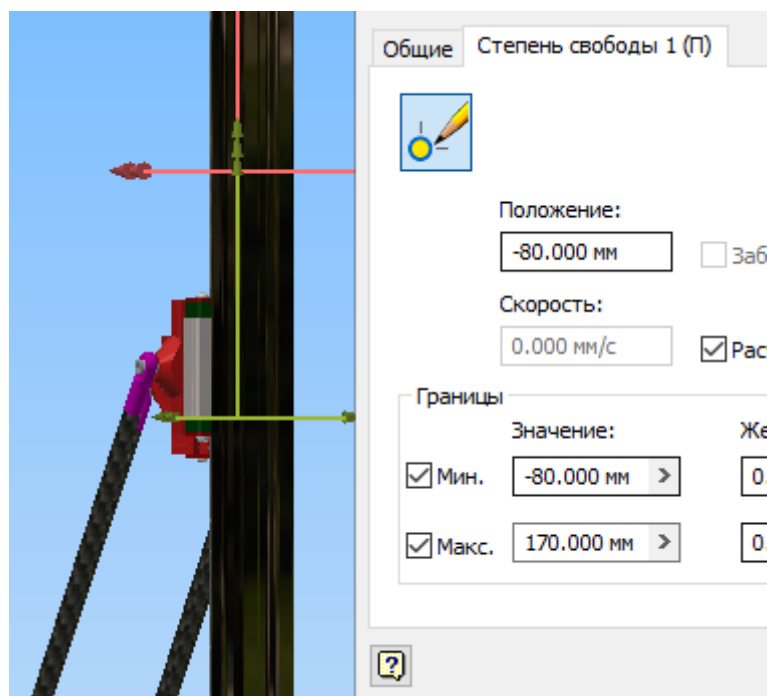


Рис. 3.20 Визначення мінімального та максимального положення каретки.

Після створення з'єднання (шляхом вставки або перетворення конструктивних зв'язків) правильність роботи механізму можна перевірити двома способами. Після використання режиму "Состояние и избыточные зависимости механизма" для усунення надлишкових залежностей можна виконати перевірку нового рішення. Механізм можна також привести у дію, не запускаючи моделювання. Існує кілька таких способів приведення механізму в дію. Одним з них передбачається використання функції "Динамическое движение. Інші способи описані нижче. Динамічний рух деталі (спрощений режим). Щоб привести механізм у дію, використовуйте функцію перетягування, яка доступна як в середовищі роботи зі складальними моделями, так і в середовищі динамічного моделювання. Цей режим схожий на режим "Динамическое движение", проте доступно менше засобів управління. Наприклад, неможливо керувати демпфуванням загального руху. Якщо перетягуються деталі пов'язані із з'єднаннями, їх поведінка обмежена ступенями свободи в з'єднаннях. Однак можна

перетягувати і деталі, не пов'язані із з'єднаннями. Слід уважно вивчити механізм для з'ясування спостережуваного типу руху.

Для приведення механізму в рух необхідно:

- В графічному вікні вибрати точку на деталі, яка повинна рухатися.
- Натиснути і утримуючи ліву кнопку миші, перемістити деталь.
- Щоб припинити рух деталі, слід просто відпустити кнопку миші.

У графічному вікні деталь буде відображатися в тому положенні, в якому вона перебувала на той момент, коли кнопка миші була відпущена.

- Кінематичний рух. Механізм можна привести у дію, змінивши вихідне положення ступені свободи стандартного з'єднання. Цей процес дозволяє перевірити правильність кінематичної функції механізму і визначити допуски для правильної роботи.

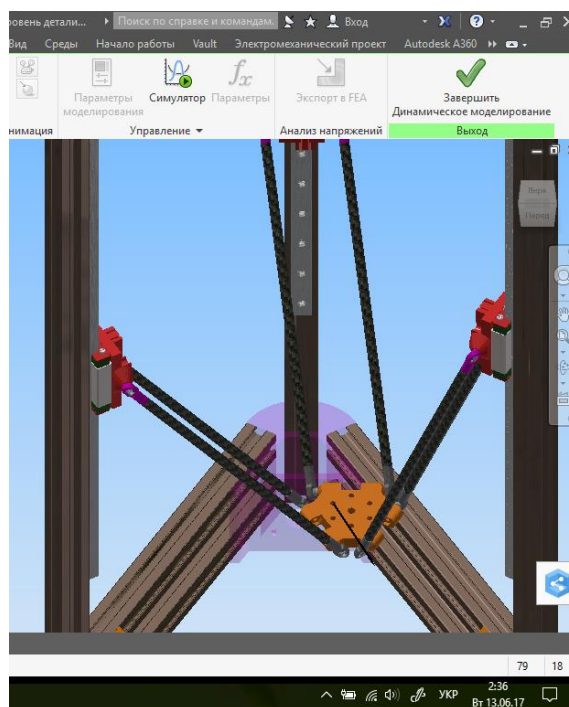


Рис. 3.21 Перевірка працездатності моделі без використання функції  
«Динамическое движение»

Для правильності подальшого моделювання задаємо внутрішні сили у з'єднаннях, так у сферичних шарнірах та направляючих присутні певні сили тертя, які слід враховувати.



Таким чином, результатом проробленої роботи у середовищі динамічного моделювання є підготовлена модель для подальшого динамічного моделювання.

### **3.3.2. Моделювання динамічних процесів в ADAMS**

ADAMS це програмний продукт корпорації MSC для динамічного та кінематичного аналізу систем твердих тіл. Основні особливості та переваги ADAMS:

- Розробка розрахункових моделей досліджуваних виробів, в максимальному ступені враховують особливості їх конструкції, включаючи високу ідентичність зовнішнього вигляду, що в багатьох випадках полегшує побудова моделей, їх налагодження та аналіз отриманих результатів;
- Виконувати розрахунок параметрів виробів, що визначають їх працездатність і точність (переміщення, швидкості і прискорення компонентів виробу, діючі навантаження, габарити простору, необхідного для рухомих частин машини і т.п.);
- Виконувати оптимізацію параметрів.

Однією з задач, що повстала при написанні цієї магістерської дисертації була оптимізація 3D-принтера та створення на основі нього багатоцільової малогабаритної роботизованої платформи на модульному принципі. Так, наприклад реалізація можливості заміни такого модулю, як інструмент ставить перед нами наступну задачу. Нехай є два інструменти Сопло з екструдером для друку та адаптивний захват. Таким чином необхідно «відірвати» надрукований зразок від повертні та перенести його за допомогою захвату в задану позицію, яка може виходити за робочу зону друку робота. Для моделювання процесу відриву та захвату необхідно було відтворити гнучкий захват показаний на рис. 3.16

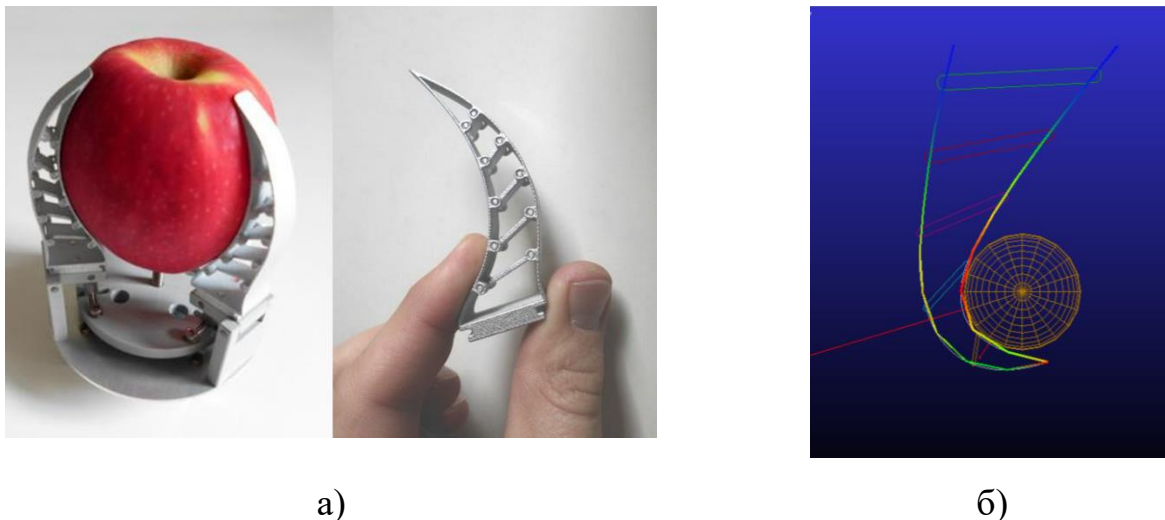


Рис. 3.22 Адаптивний захватний пристрій, а – робочий прототип, б – модель ADAMS

ADAMS дозволяє моделювати:

- Мульти-контакт
- Динамічне тертя
- Контакт між тривимірною суцільною геометрією
- Контакт між двовимірними геометріями

Adams solver (C++) має два двигуни геометрії, які він використовує для тривимірних контактів. Він використовує Parasolid, інструментарій геометрії з EDS / Unigraphics і RAPID. В даний час RAPID є типовим, а Adams Solver (C++) підтримує версію 2.01. Адамс Солвер розрізняє деякі геометрії як аналітичні.

Наступні типи контактів є повністю аналітичними. Ці обидві геометрії розглядаються аналітично.

- Сфера по сфері
- Циліндр по циліндру

Для моделювання захвата довільного об'єкта адаптивним захватом необхідно використовувати чисельні методи. Моделювання контакту можна розділити умовно на два етапи. Перший це моделювання нормальної складової сили та другий це моделювання тангенціальних. На рисунку 3. 17 відображені компоненти функції моделювання контакту в ADAMS.

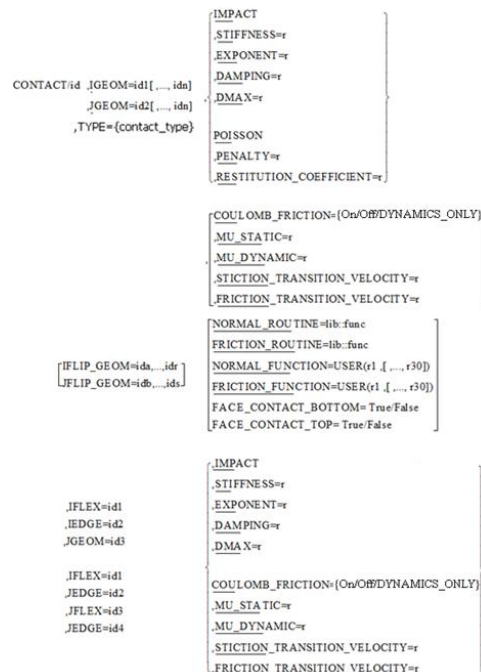


Рис. 3.23 Елементи функції контакту в ADAMS

У Adams Solver (C++) доступні дві моделі для розрахунку нормальної сили:

- Модель функції ІМПАКТ•
- Коефіцієнт реституції або модель POISSON

Обидві моделі є результатом регуляризації нормальних контактних обмежень. Штрафна регуляризація є методикою моделювання в механіці, в якій обмеження прикладається математично, застосовуючи сили вздовж градієнта обмеження. Величина є функцією порушення обмеження. Контакт між твердими тілами теоретично вимагає, щоб два тіла не проникали один в одного. Це можна виразити як одностороннє (нерівність) обмеження. Контактна сила є силою, пов'язаною із застосуванням цього обмеження. Обробка цих допоміжних обмежень

зазвичай здійснюється одним з двох способів - або шляхом введення множників Лагранжа, або шляхом регуляризації штрафів. Для проблем контакту, остання техніка має перевагу простоти; не вводяться додаткові рівняння або змінні. Це особливо корисно при переривчастому контакті і алгоритмічному управлінні активними і неактивними умовами, пов'язаними з односторонніми обмеженнями. Крім того, поняття легко інтерпретується з фізичної точки зору. Наприклад, величина сили контакту реакції дорівнює добутку жорсткості матеріалу і проникненню між контактуючими тілами, подібною до сили пружини. З цих причин, розв'язувач Adams (C++) використовує регуляризацію покарання для забезпечення всіх обмежень контакту. (рис. 3.18)

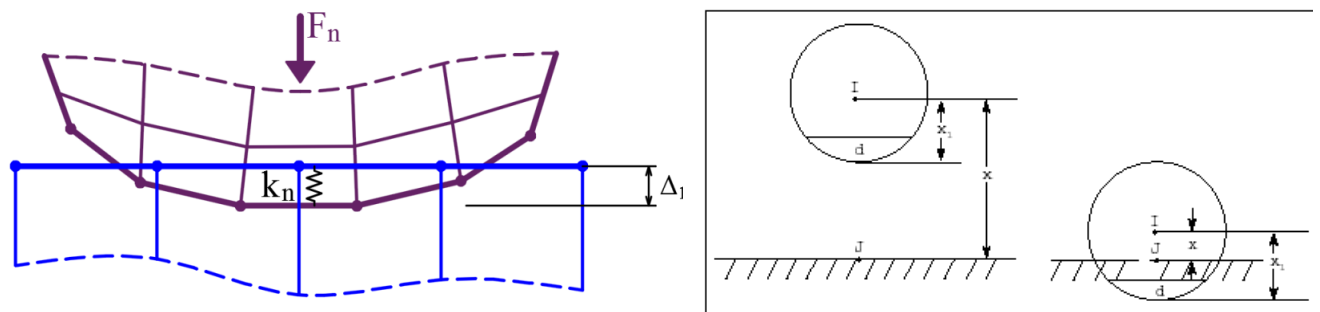
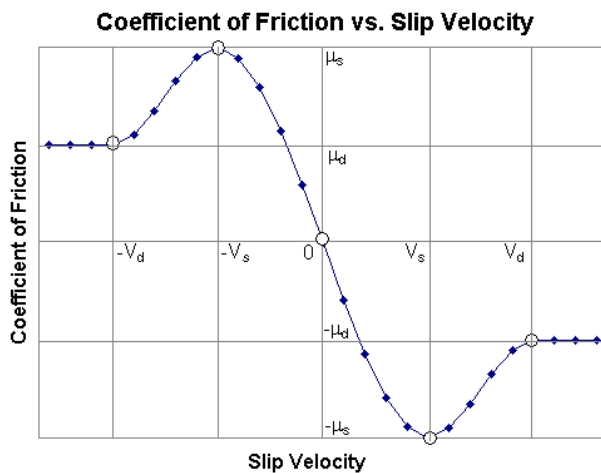


Рис. 3.24 Чисельне моделювання контакту – а та використання функції IMPACT для моделювання контакту -б .

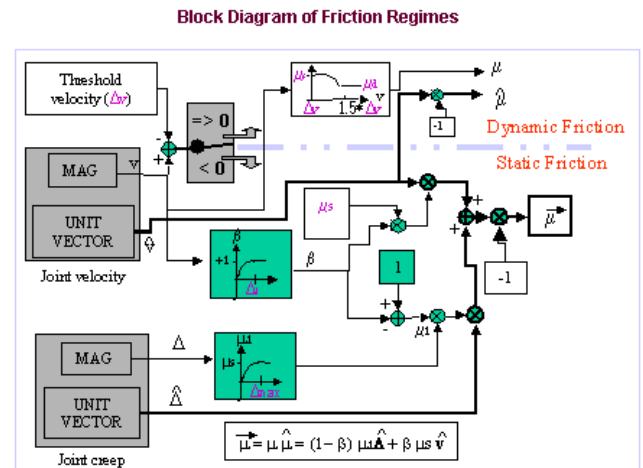
Моделювання нормальної складової сили контакту найбільш зручно використовувати форму IMPACT. Тоді обчислення сили зводиться до натеупної формули:

$$IMPACT = \begin{cases} \text{Max}(0, k(x_1 - x)^e - STEP(x, x_1 - d, c_{max}, x_1, 0) \cdot \dot{x}) & : x < x_1 \\ 0 & : x \geq x_1 \end{cases} \quad [3.19]$$

Adams Solver (C++) використовує відносно просту модель на основі швидкості тертя для контактів. Вказівка поведінки на тертя необов'язкова. На рисунку нижче показано, як коефіцієнт тертя змінюється зі швидкістю ковзання.



a)



б)

Рис. 3.25 Моделювання тертя при контакті в ADAMS

### 3.3.3 Побудова моделі для вібро та модального аналізу

Аналіз сигналів являє собою процес визначення від-кликів системи на невідоме в обшем разі порушення і подання їх в такій формі, яку легко зрозуміти.

Аналіз систем є методом визначення характерних властивостей систем. Він може бути проведений шляхом порушення системи за допомогою заміряються сил і визначення ставлення відгук / сила (чутливість). Для лінійних систем це відношення є незалежним, властивим цим системам параметром. Цей параметр залишається постійним незалежно від того, якщо система знаходиться в збудженому стані або в стані спокою.

Частотна характеристика заданого вихідного каналу - залежність амплітуди вихідного сигналу пристрою або системи передачі, підсилення або обробки сигналу від частоти вхідного сигналу сталої амплітуди. Для обчислення частотного відгуку лінеаризовану модель представляють як:

$$\begin{aligned} \mathbf{s}\mathbf{x}(s) &= \mathbf{A} \mathbf{x}(s) + \mathbf{B} \mathbf{u}(s) \\ \mathbf{y}(s) &= \mathbf{C} \mathbf{x}(s) + \mathbf{D} \mathbf{u}(s), \end{aligned} \quad [3.20]$$

Де:

- $s$  - змінна Лапласа;

- A, B, C і D є матрицями стану для лінеаризованої моделі.
- $x(s)$  є перетворенням Лапласа станів лінеаризації.
- $u(s)$  і  $y(s)$  є перетвореннями Лапласа вхідних і вихідних каналів.

АЧХ обчислюється за:

$$H(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = C(sI - A)^{-1}B + D \quad [3.21]$$

Основним проблемою при віброаналізі є побудова відповідної математичної моделі. Вона має відображати всі важливі рухомі маси та пружні елементи. Для віброаналізу 3D-принтера на основі траглайду були використані концепції та моделі показані на рисунку 3.26

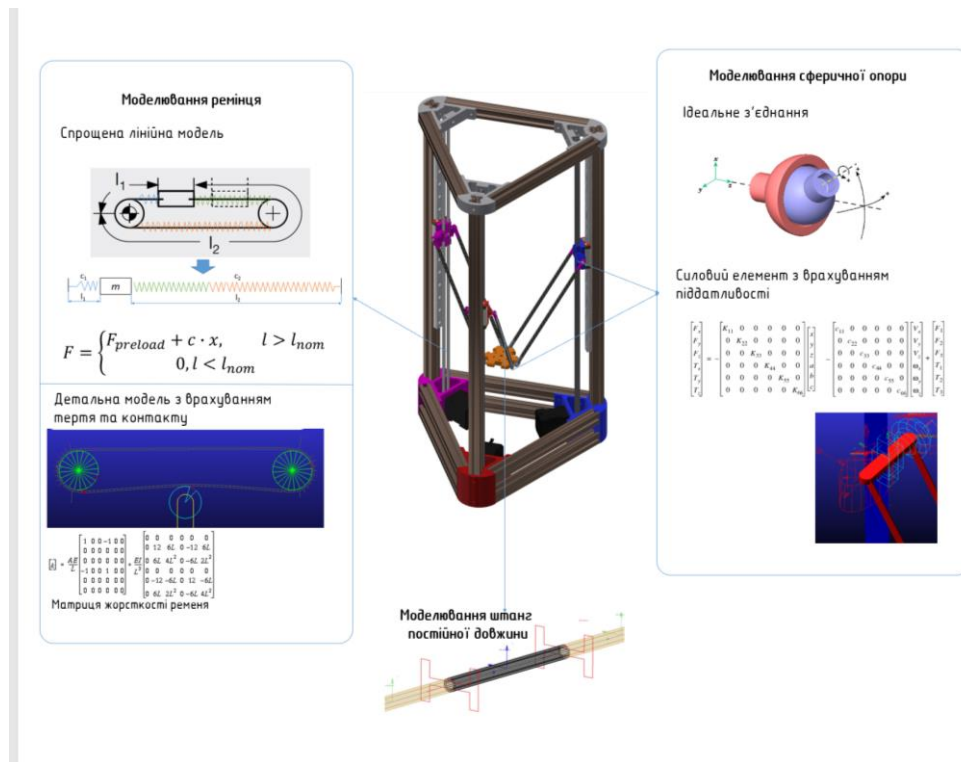


Рис. 3.26 Деякі концепції та субмоделі (submodels) для реалізації динамічного аналізу

На рисунку 27 показана АЧХ в низькочастотному діапазоні для 3D-принтера з ШВП замість ременя.

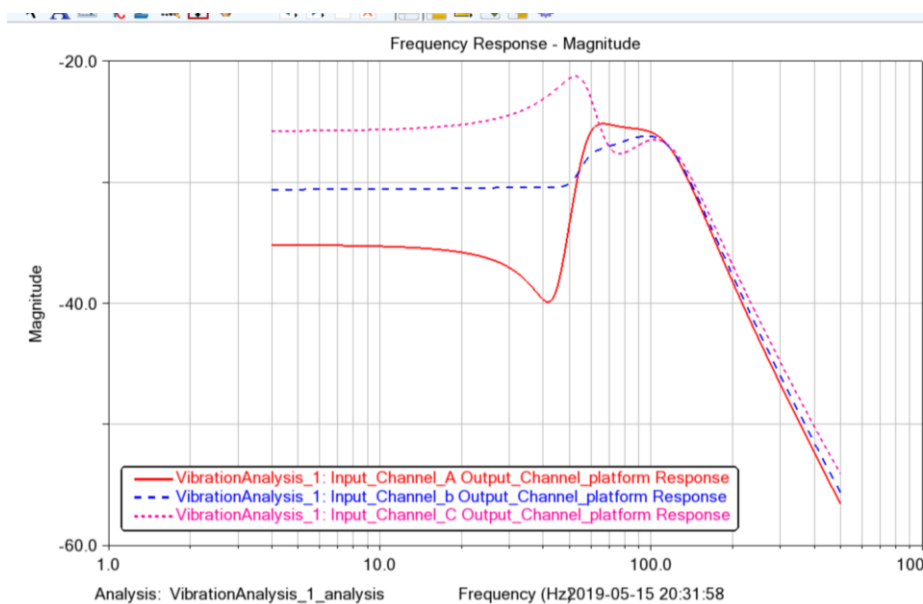


Рис. 27 АЧХ для 3D-принтера на основі триглайду з ШВП у низькочастотному діапазоні.

Модель з модальними параметрами показана на рисунку нижче. Вона побудована за допомогою двох параметрів, які можуть бути отримані за результатами вимірювання частотних характеристик. На даному малюнку функція  $H(\omega)$  визначається координатами полюса ( $p$ ) і відрахування ( $R$ ) і їх комплексні пов'язаними величини ( $p^*$  і  $R^*$ ). Координата полюса і відрахування в свою чергу визначається через просторові параметри. Координата полюс є комплексною величиною. Чисельне значення її дійсна частина ( $\sigma$ ) представляють собою швидкість загасання коливань. це показано на графіку залежності імпульсної характеристики від часу. У частотній області  $\sigma$  є половиною ширини смуги (-3 дБ) піку частотної характеристики. Уявна частина координати полюса являє собою модальну частоту - власна частота вільно затухаючих коливання ( $\omega_d$ ). Відрахування в разі системи з одним ступенем свободи представляє собою вдавану величину, яка відображає інтенсивність моди коливань.

На рисунку 28 показані усі моди коливань 3D-принтера на основі триглайду.

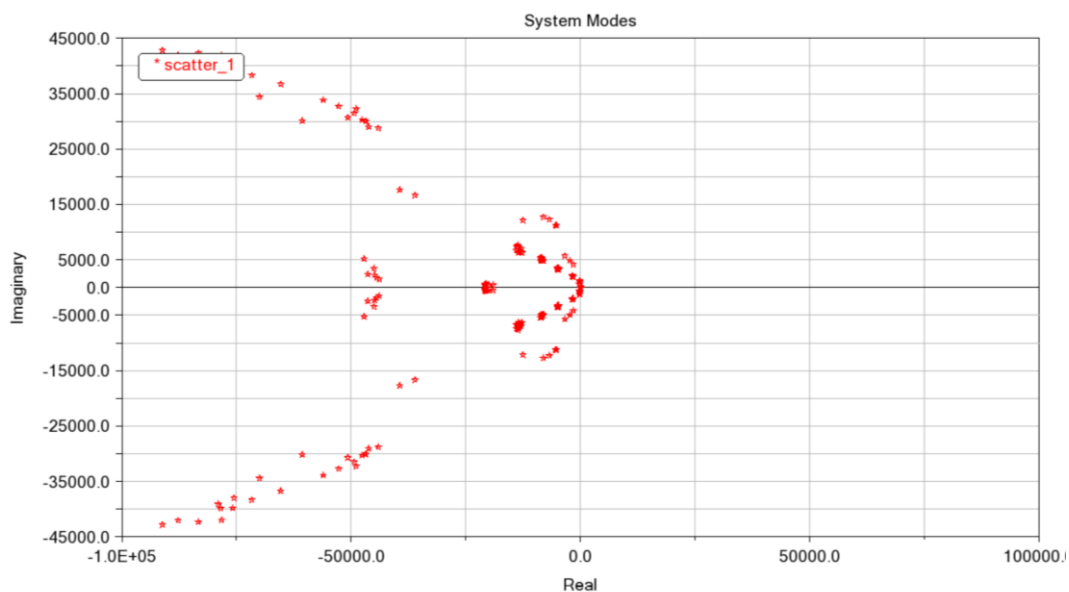
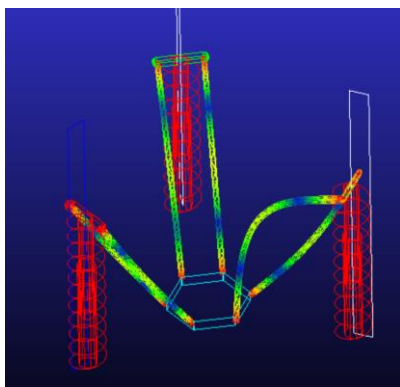


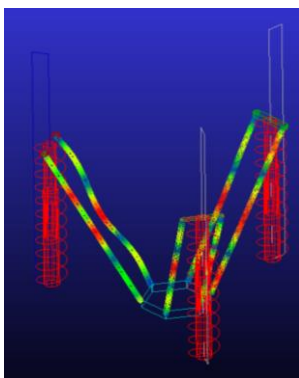
Рис. 3.28 Моді коливань 3D-принтера на основі триглайду з врахуванням підатливості ремня та штанг постійної довжини.

В таблиці 3.6 показані деякі форми мод з робочого діапазону частот.

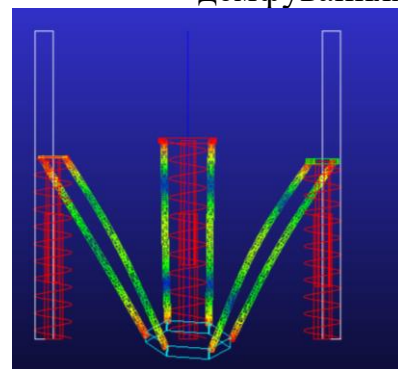
Таблиця 3.6  
Деякі моди коливань 3D-принтера з відповідними частотами та відносним демфуванням



$$\omega_d = 561 \text{ Hz}; \varepsilon = 40\%$$



$$\omega_d = 3300 \text{ Hz}; \varepsilon = 80\%$$



$$\omega_d = 1175 \text{ Hz}; \varepsilon = 14\%$$



### **3.4 Висновки**

У даному розділі були знайдені математичні залежності, які описують кінематику 3D-принтера на основі триглайду, графо-аналітичним методом. На основі отриманих залежностей була написана програма в середовищі Matchcad, яка дозволяє вираховувати переміщення, прискорення та швидкості кареток в залежності від траєкторії руху робочого органу на платформі триглайда. Результати цих досліджень були покладені в основу створення лабораторної роботи з курсу «ТО з МПС» (Розділ 5, Додаток Б.)

Були відтворені алгоритми для автокалібрування 3D-принтера на основі триглайду.

## РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ 3D-ПРИНТЕРА

### 4.1. Розробка методів та аналіз підвищення жорсткості 3D-принтера на основі триглайду за рахунок створення регульованого натягу в рухомих з'єднаннях

Похибки переміщення вихідної ланки механізму паралельної структури визначаються кінематичними похибками, пов'язаними з зазорами в кінематичних парах, температурними змінами довжин ланок, а також пружними деформаціями ланок

Основна вимога до конструкцій ТО, на яких щось виготовляється в тому числі і методом адитивних технологій, це зниження вібрацій у системі. Такі похибки у значній мірі впливають на якість обробленої поверхні.

В стержневих механізмах вібраційні коливання повинні бути виміряні та контрольовані. В таких системах зменшення вібрацій в процесі руху, контроль напружень, що виникають і забезпечення необхідної точності досягається в основному за рахунок налаштування системи керування. Але завжди необхідно детально проаналізувати конструкцію, аби вжити попередніх мір, з точки зору вдосконалення конструкції для мінімізації можливих похибок, тим самим спрощуючи систему керування.

Однією з проблем, що виникає у обладнанні з МПС зі штангами постійної довжини є наявність кінематичних пар з кількістю ступенів вільності більше одиниці. Найчастіше це карданні або сферичні шарніри. Такі елементи конструкції значно важче контролювати з точки зору забезпечення точності переміщень ніж у шарнірах з одним ступенем вільності (підшипники обертання, лінійні підшипники). Основним параметром, що відповідає за точність у будь-яких шарнірах це забезпечення потрібного натягу або зазору.

Так у 3D-принтері на основі триглайду використовуються штанги постійної довжини з сферичними шарнірами. Даний дипломний проект покликаний знайти нові підходи для забезпечення точності переміщень робочого органу

Отже задачу підвищення жорсткості 3D-принтера на основі триглайду зводиться до вибірки зазорів у сферичних шарнірах 1 та створення сили натягу між штангами постійної довжина 2 (рис. 4.1). Крім того необхідно розрахувати та знайти необхідну силу натягу та обчислити строк експлуатації шарнірів.

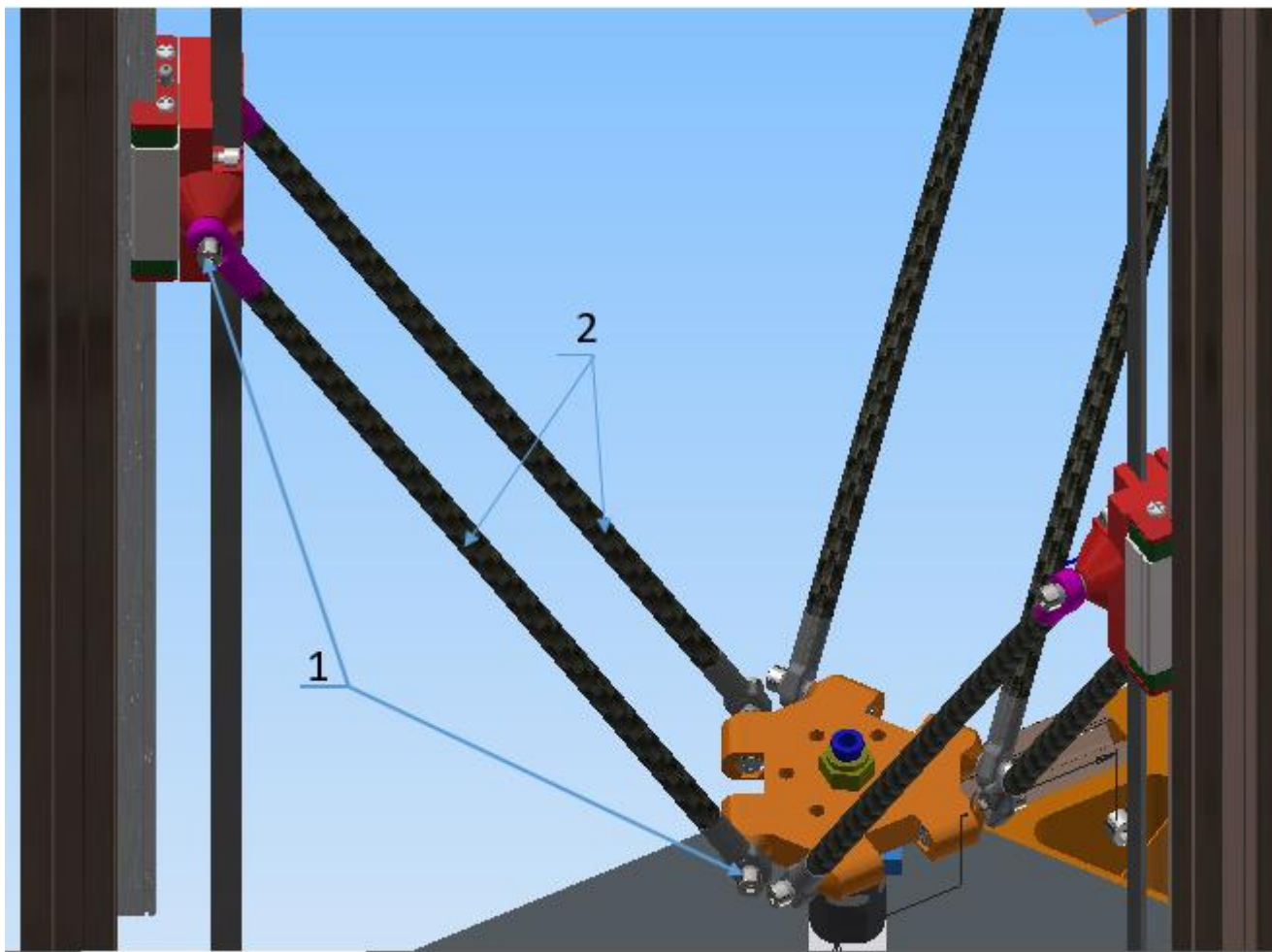
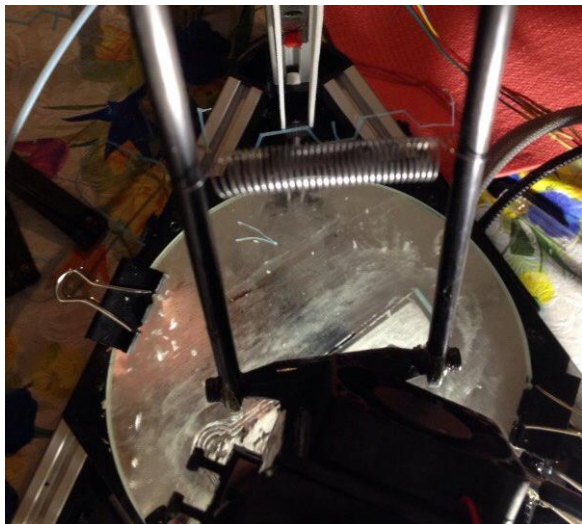


Рис.4.1. Частина модуля переміщень 3D-принтера (шарніри -1 та штанги-2)

Таким чином слід спроектувати механізм, який би забезпечував необхідну силу натягу з можливістю її регулювання. На сьогоднішній день в механізмах з СПК подібної компоновки для використовуються варіанти реалізації показані на рис.4.2. Така конструкція є відносно простою. За попереднім розрахунком обирається пружина, або інший пружний елемент. Та встановлюється між штангами, забезпечуючи попередньо розраховану силу натягу. Основним недоліком такого рішення є:

- відсутність можливості регулювання;
- можливість виникнення автоколивань, через підвищення пружності системи,.



а)



б)

Рис. 4.2. Варіанти реалізації раніше знайдених технічних рішень для забезпечення жорсткості модуля переміщень, а – 3D-принтер на основі триглайду, б – промисловий робот Festo Tripod

В процесі пошуку технічного рішення з врахуванням в.в. недоліків існуючих пристосувань була знайдена концепція показана на схемі (рис.4.3). З даної схеми випливає, що вибірку зазорів  $a$  можливо створити у шарнірах 1, через прикладання сили  $P$  до граней штанг 2 за допомогою регулюючого гвинта 4 що встановлений у спеціальному пристосуванні 3.

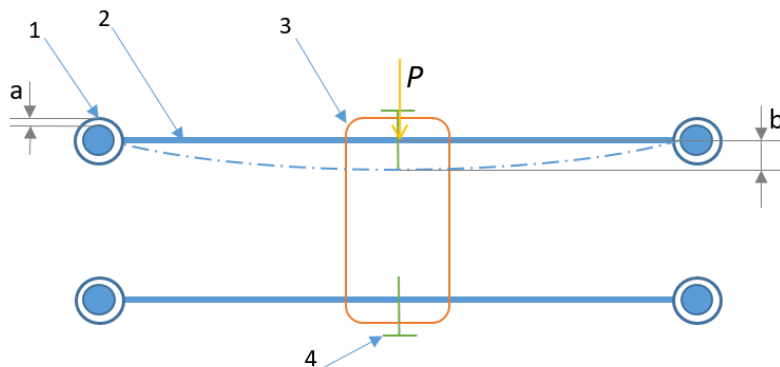


Рис. 4.3 Запропонована схема регулювання натягу в шарнірах

Таким чином конструкторська задача на першому етапі зводиться до проектування оптимального пристосування (3) з точки зору наступних факторів:

- Забезпечення можливості регулювання,
- Оптимальна геометрія для усунення можливості виникнення геометричних замків у системі,
- Достатня жорсткість.

Після декількох ітерацій з друком на 3D-принтері та випробуванні на ньому, була знайдена оптимальна компоновка системи забезпечення жорсткості модуля переміщень 3D-принтера на основі триглайду. Була розроблена твердотільна модель, яка показана на рис.4.4.

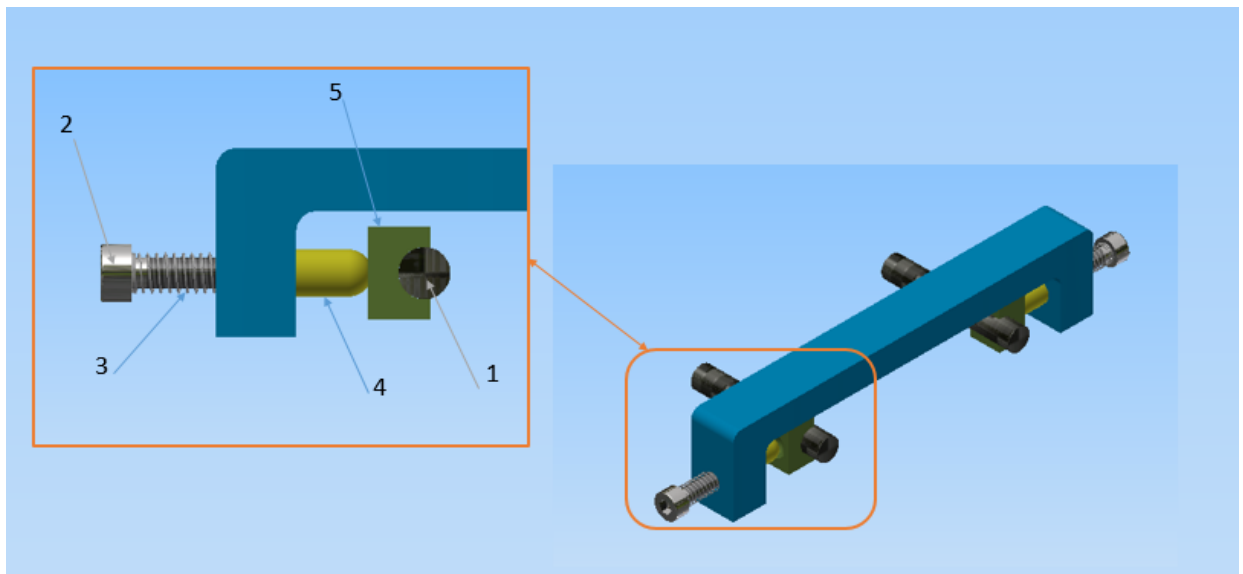


Рис. 4.4 Твердотільна модель системи забезпечення жорсткості модуля переміщень (1-штанга 3D-принтера, 2- регулюючий гвинт М3х0,35-6gx25, 3 – пружина, 4- насадка на гвинт з сферичною головою, 5 – накладка на штангу.

Таким чином слід вирішити наступну задачу. Провертання регулюючого гвинта М3х0,35-6gx25 на один оберт дає його осьове переміщення на 0,35 мм. Так

відповідно до схеми на рис 4.3. Можна розглядати штангу(2), як балку на двох опорах 1. В поперечному перерізі ця балка являє собою трубу з зовнішнім діаметром  $D = 6$  мм та внутрішнім  $d = 3$  мм, та виготовлена з вуглеволокна. Маючи ці вхідні дані, та знаючи точку прикладання сили, можемо змодельовати в середовищі Autodesk Inventor за допомогою МКЕ деформовано-напружений стан та знайти залежність між силою натягу  $P$  та прогином штанги  $b$ . Отримана залежність дасть можливість визначити реакцію в опорі 1 та в подальшому знайти оптимальну силу натягу, враховуючі такі розраховані параметри, як:

- Строк служби опори,
- Допустима швидкість,
- Статичний запас міцності.

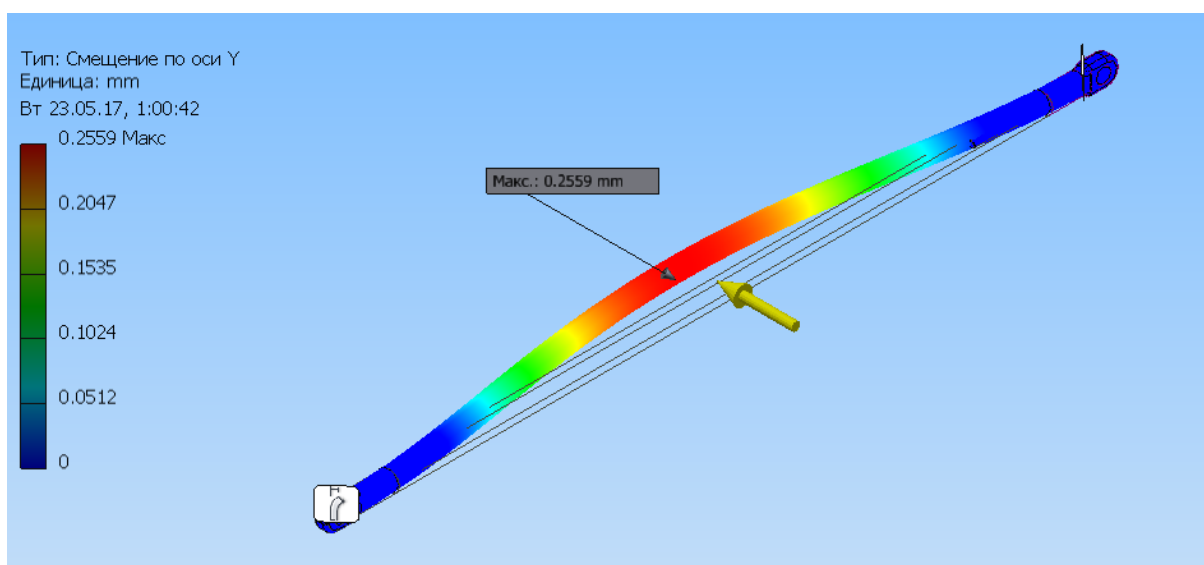
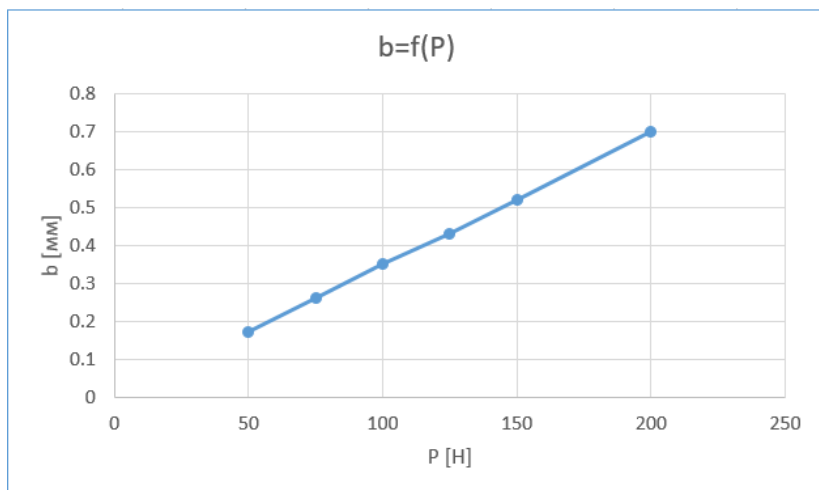


Рис. 4.5 моделювання процесу навантаження штанги під дією сили  $P$  для знаходження закону  $P=f(b)$  в середовищі Autodesk Inventor за допомогою МКЕ.

№	Сила Р (Н)	Прогин b (мм)
1	50	0,17
2	75	0,26
3	100	0,35
4	125	0,43
5	150	0,52
6	200	0,7

а)



б)

Рис. 4.6 Залежність між силою що діє на штангу Р (Н) та прогином b (мм), отриманих за МКЕ, а –таблиця, б - графік

Далі розрахуємо максимально допустиму силу, що може діяти на сферичний шарнір. Розглянемо положення шарніру, як показано на рис. \_\_\_\_, адже в такому положенні контактні напруження є максимальними. З каталогу фірми SKF візьмемо вхідні дані про опору, що використовується в 3D-принтері на основі триглайду (рис.\_\_).

$$d = 5 \text{ мм}$$

$$d_2 = 19 \text{ мм}$$

$$G - M4-6g$$

$$B = 8 \text{ мм}$$

$$C_1 = 6 \text{ мм}$$

$$h = 33 \text{ мм}$$

$$\alpha = 13^\circ$$

$$C = 3.25 \text{ кН}$$

$$C_0 = 4,8 \text{ кН}$$

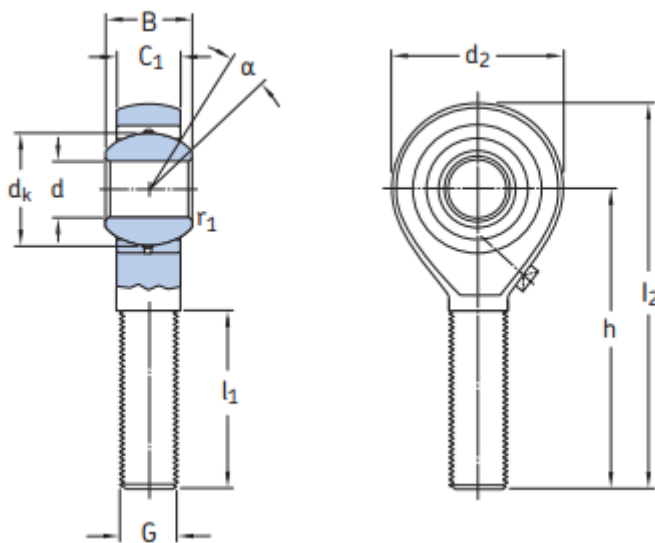


Рис. 4.7 Ескіз шаріру та його характеристики з каталогу SKF

$$[P] = C_0 \cdot a_2 \cdot a_6, \quad (4.1)$$

де  $a_2$  – температурний коефіцієнт (для даних умов роботи  $a_2 = 1$ ),  $a_6$  – коефіцієнт, що враховує тип навантаження (для даних умов роботи  $a_6 = 0,35$ , циклограма навантажень показана на рис. 4.8 , б.), тоді:

$$[P] = 4.8 \cdot 1 \cdot 0.35 = 1.68 \text{ кН} \quad (4.2)$$

Тепер знаючи максимально допустиму силу, вирахуємо силу, що діє в шарнірі, як силу реакції опори від прикладеного навантаження (див. схему навантаження на рис. 4.3)

$$P_o = F_r = |P/2| \quad (4.3)$$

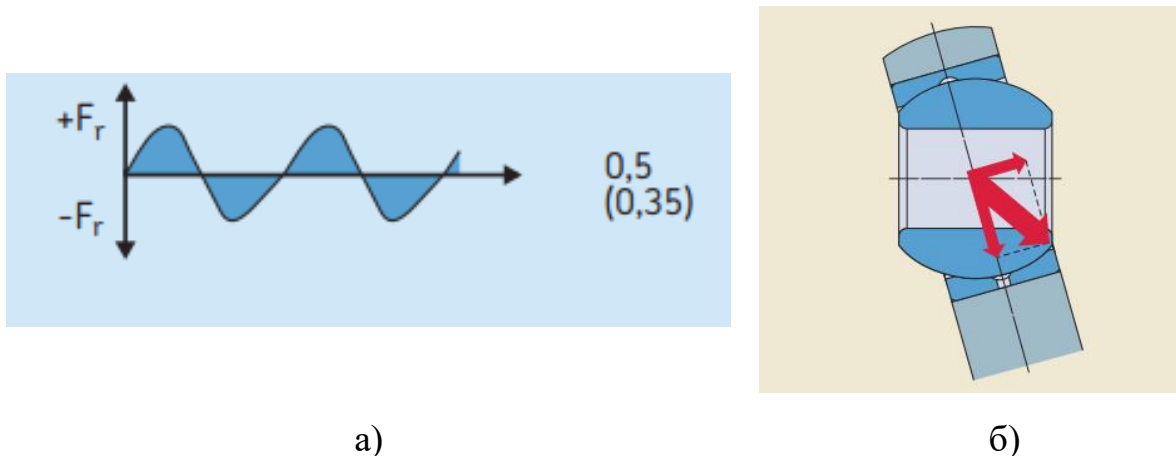


Рис. 4.8. Навантаження на шарнір. а- циклограма навантажень, б- схема шарніру та напрямок сили

Розрахуємо найважливіші експлуатаційні параметри опори, для знаходження оптимальної сили натягу:

$$G = b_1 \cdot b_2 \cdot b_3 \cdot b_4 \cdot b_5 \cdot \frac{3}{D_a \cdot \beta} \cdot \frac{C}{P} \cdot 10^8 \quad (4.4)$$

$$G = 5 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot \frac{3}{8 \cdot 15} \cdot \frac{4,25}{0,2} \cdot 10^8 = 1.7 \cdot 10^7 \quad (4.5)$$

, де  $b_1$ -коефіцієнт врахування напрямку навантаження(5),  $b_2$ - коефіцієнт, що враховує умови змащування 1,  $b_3$  – коефіцієнт температури,  $b_4$ -розмірний



коефіцієнт  $1$ ,  $b_5$ - коефіцієнт, що враховує властивості матеріалу (0,8).  $D_a$  – діаметр сфери.  $\beta$  – половина кута коливань

Попередній аналіз показав, що сили, які виникають за рахунок використання пристосування, що проектується є на порядок нижчими за максимально допустимі, тому оптимальна сила натягу буде обиратися на основі досвіду експлуатації та аналізу зразків, що будуть виготовлені з різною силою натягу в шарнірах.

## **4.2. Аналіз матеріалів для FDM друку та дослідження їх міцнісних характеристик**

### **4.2.1 Огляд матеріалів, що використовуються для FDM друку**

Технологія FFF/ FDM має масу переваг, серед яких відносна простота конструкції принтерів і цінова доступність як пристроїв, так і витратних матеріалів. Причому, асортимент матеріалів є, мабуть, самим широким серед всіх доступних технологій. Як правило, для друку використовуються термопластики, але є і виключення - композитні матеріали, що містять різні добавки, але засновані на термопластику. У цьому розділі будуть висвітлені основні характеристики пластиків для 3D-друку а також процес дослідження деяких міцнісних характеристик для вибору оптимального варіанту пластику в контексті поставлених конструкторських задач. Таблиця основних матеріалів для FDM-друку наведена на рис. 4.9

<b>ABS</b> Acrylonitrile butadiene styrene ± 220-260°C    40 - 80 mm/s	<b>BF</b> bronzeFil ± 195-220°C    40 - 100 mm/s	<b>FF</b> Filaflex ± 210-230°C    30 - 50 mm/s	<b>GF</b> glowFil ± 195-220°C    40 - 100 mm/s	<b>HIPS</b> High-impact Polystyrene ± 230-240°C    40 - 80 mm/s
<b>LB</b> Laybrick ± 160-220°C    40 - 80 mm/s	<b>LW-3</b> Laywoo-D3 ± 185-235°C    40 - 100 mm/s	<b>NF</b> NrgaFlex ± 210-225°C    25 - 35 mm/s	<b>PC</b> Polycarbonate ± 295-305°C    40 - 80 mm/s	<b>PET</b> Polyethylene terephthalate ± 220-255°C    40 - 70 mm/s
<b>PLA</b> Polylactic acid ± 180-220°C    40 - 100 mm/s	<b>POM</b> Polyoxymethylene ± 225-260°C    40 - 100 mm/s	<b>PP</b> Polypropylene ± 180-220°C    40 - 100 mm/s	<b>PVA</b> Polyvinyl alcohol ± 210-220°C    40 - 80 mm/s	<b>T-G</b> T-Glass ± 210-224°C    25 - 34 mm/s
<b>T618</b> Taulman 618 ± 240-250°C    25 - 34 mm/s	<b>T645</b> Taulman 645 ± 220-265°C    25 - 34 mm/s	<b>TB</b> Taulman Bridge ± 240-250°C    25 - 34 mm/s	<b>TC</b> Thermochrome ± 200-225°C    40 - 80 mm/s	<b>WF</b> woodFil ± 195-225°C    40 - 100 mm/s

Рис. 4.9. Таблиця матеріалів для FDM друку.

PLA-пластик (полілактид, ПЛА) - є біорозкладаним, біосумісним, термопластичним алифатическим полієфіром, структурна одиниця якого - молочна кислота. ПЛА-пластик виробляють з кукурудзи або цукрового очерету. Сировиною для отримання також картопляний і кукурудзяний крохмаль, соєвий білок, целюлоза. На сьогоднішній день полілактид активно використовується в якості витратного матеріалу для друку на 3D-принтерах.

Натуральна природна сировина в складі PLA-пластика дозволяє без загрози для здоров'я людини застосовувати його для різних цілей. При виготовленні ПЛА-пластика значно скорочуються викиди вуглекислого газу в атмосферу в порівнянні з виготовленням «нафтових» полімерів. На третину зменшується використання

викопних ресурсів, застосування розчиняючих речовин не потрібно взагалі. Як правило, PLA-пластик поставляється у вигляді тонкої нитки, яка намотана на котушку.

Технічні характеристики PLA-пластика наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Температура плавлення	173-178°C
Температура розм'якшення	50°C
Твердість (по Роквеллу)	R70-R90
Температура склування	60-65°C
Щільність	1,23-1,25 г/см <sup>3</sup>
Розмір найдрібніших деталей	0,3 мм
Усадка при виготовленні виробів	нема
Вологопоглинання	0,5-50%

До плюсів застосування ПЛА пластику слід віднести наступні:

- нетоксичний;
- широка палітра кольорів;
- для друку немає необхідності в нагрітій платформі;
- розміри стабільні;
- ідеальний для рухомих частин і механічних моделей;
- відмінне ковзання деталей;
- економія енерговитрат через низьку температури розм'якшення нитки;
- немає необхідності застосовувати каптону для поверхні для нарощування прототипу;
- гладкість поверхні надрукованого виробу;
- отримання більш детальних і повністю готових до застосування об'єктів.

#### 4.2.2. Випробування зразків пластику для FDM друку на розтяг та розрахунок характеристик

Як вже було зазначено, даний дипломний проект є невід'ємною частиною Науково-дослідної роботи зі створення Біоманіпулятора кінцівки руки людини. Для створення повноцінного біоманіпулятора та його несучих та механічних частин на 3D-принтері необхідно було провести аналіз напруженого стану конструкції для вибору оптимальної. Для такого аналізу необхідно знати певні механічні властивості матеріалу.

В зв'язку з відсутністю достатньої інформації щодо міцнісних характеристик готових моделей з ПЛА та АБС пластику у відповідних джерелах, за ціль було поставлено власноруч провести дослідження руйнуванням для отримання найважливіших міцнісних характеристик, аби в подальшому порівняти та обрати найкращий варіант.

На першому кроці необхідно було обрати оптимальну форму та розміри досліджуваних зразків для випробування на стенді на розтяг. За ГОСТ 11262-80. Пластмаси. Методи випробувань на розтяг. Пропонується декілька гантельних форм зразків, ескізи яких показані на рис. 4.10.

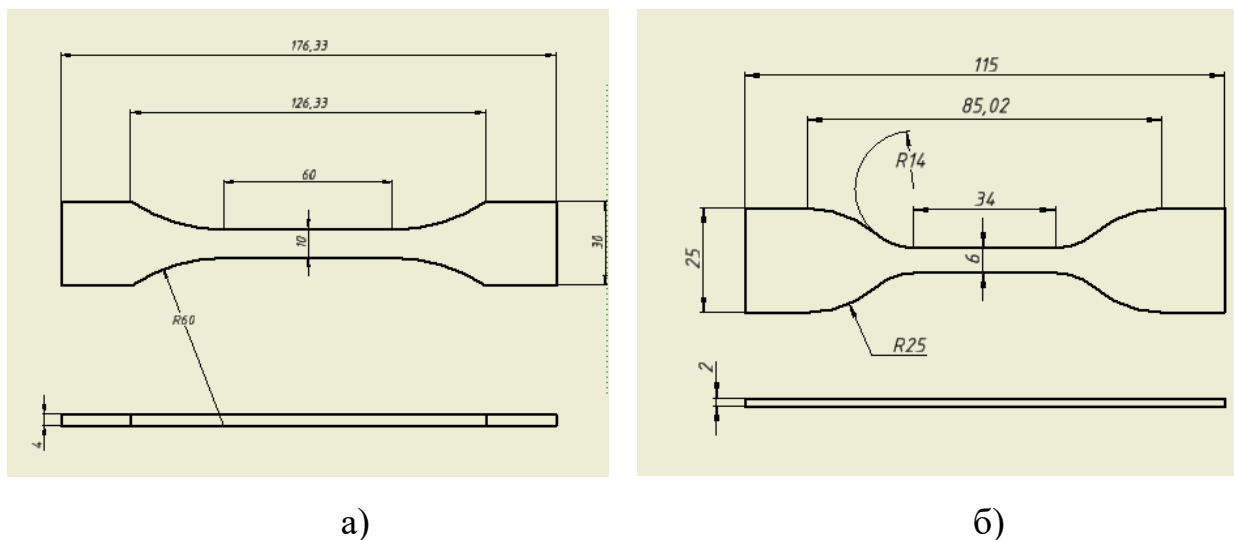


Рис.4.10. Ескізи пластикових зразків для випробування на розтяг за ГОСТ 11262-80. Пластмаси. Методи випробувань на розтяг.

З міркувань технологічності друку серії зразків був обраний варіант (рис. 4.10). Далі була спроектована твердотільна модель зразку за ескізом з рифленням на лопатках для усунення можливості проковзування у затискних губках стенду (рис. 4.11)

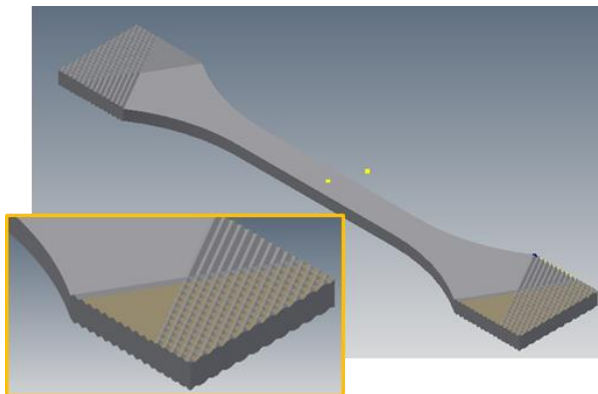


Рис. 4.11. Твердотільна модель зразка в Autodesk Inventor з рифленням.

На першій ітерації випробувань було прийнято рішення роздрукувати 4 партії різних зразків, що відрізняються між собою за матеріалом, діаметром сопла 3D-принтера та кроком друку. Усі зразки були виготовлені з 100% заповненням для монолітності конструкції. Такі характеристики були обрані, через те що саме крок друку та матеріал найбільше впливають на міцність готової моделі. Таблиця з характеристиками зразків наведена нижче (табл. 4.2).

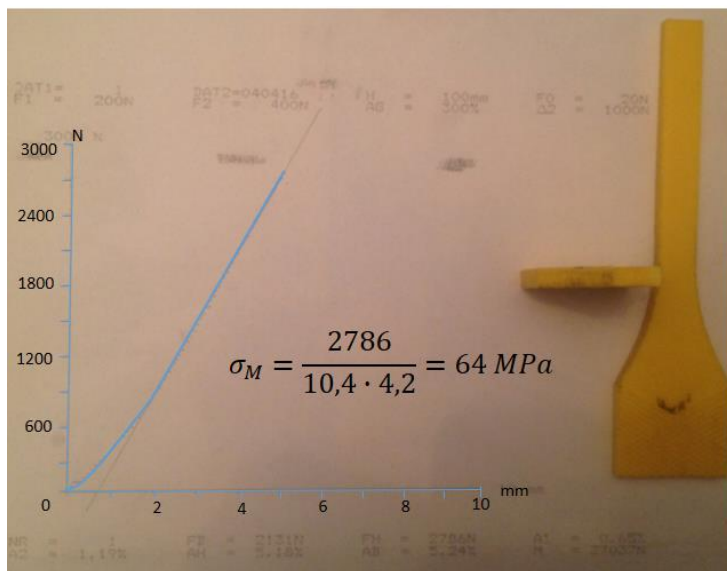
Таблиця 4.2

Серії зразків для випробування на розтяг			
№	Вид матеріалу (ISO 19062-1:2015 , Plastics)	Діаметр сопла 3D-принтера (мм)	Крок друку (мм)
1.	PLA	0,3	0,17
2.	PLA	0,4	0,2
3.	ABS	0,3	0,17
4.	ABS	0,4	0,2

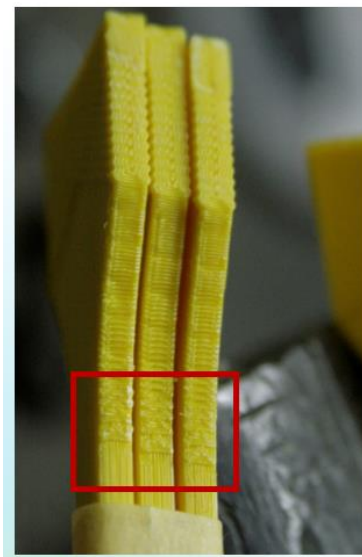


Рис. 4.12. Фото серії зразків

Перші випробування проводилася на стенді Tira test 2003. Були отримані перші результати у вигляді такої характеристики як межа текучості та кривої, що описує залежність  $P = f(\Delta l)$  (рис. 4.13, а). Але такі результати є неточними, через те що зразок був зруйнований не по середині, а біля краю лопатки.



а)



б)

Рис. 4.13. Результати перших випробувань на розтяг – а, наявність концентраторів напружень на торці зразка - причина неточних результатів

– б.



Такі результати можна пояснити присутністю концентраторів напружень на торцях зразку (рис. 4.13, б), зумовлених особливістю пошарового нанесення пластику при формуванні виробу.

Далі були вжиті спроби з механічної обробки торців зразку для позбавлення від наявних концентраторів. Але внаслідок ручної механічної обробки (рис. 4.14 ) були втрачені допуски на розташування та форму, що були закладені в моделі зразку.



Рис. 4.14. Процес ручної механічної обробки зразків для позбавлення від концентраторів напружень на торцях зразку

Таким чином друга ітерація показала, що необхідно, або обробляти зразки на фрезерному верстаті з ЧПК, що є відносно дорогим процесом, або шукати інші варіанти проведення досліджень. Так, було прийнято рішення, спростити

дослідний зразок, надавши йому прямокутну форму, а враховуючі особливості попередніх досліджень, розробити серію зразків, що відрізняється за поперечною та поздовжньою орієнтацією друку. На рис. 4.14 наведені фото випробувань прямокутних зразків на розтяг

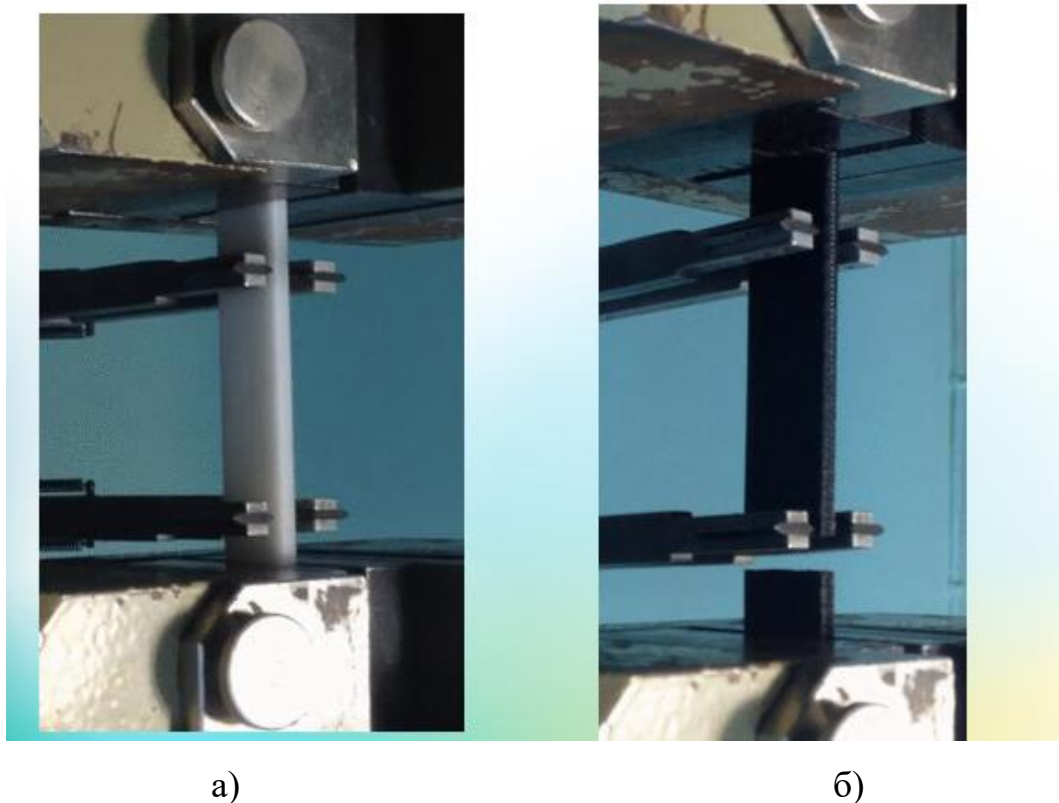


Рис. 4.15. Випробування на розтяг прямокутних зразків. а - PLA Поперечно орієнтований друк, б - ABS Поздовжньо орієнтований друк ||

Кінцеві результати випробувань викладені на рис.4.16. Серед кожної серії зразків був обраний найкращий з точки зору отриманих значень  $P_{max}$ ,  $P_R$ ,  $\Delta L_{max}$ ,  $\Delta L_R$  варіант Пластику, а саме PLA (Поздовжньо орієнтований друк ||).



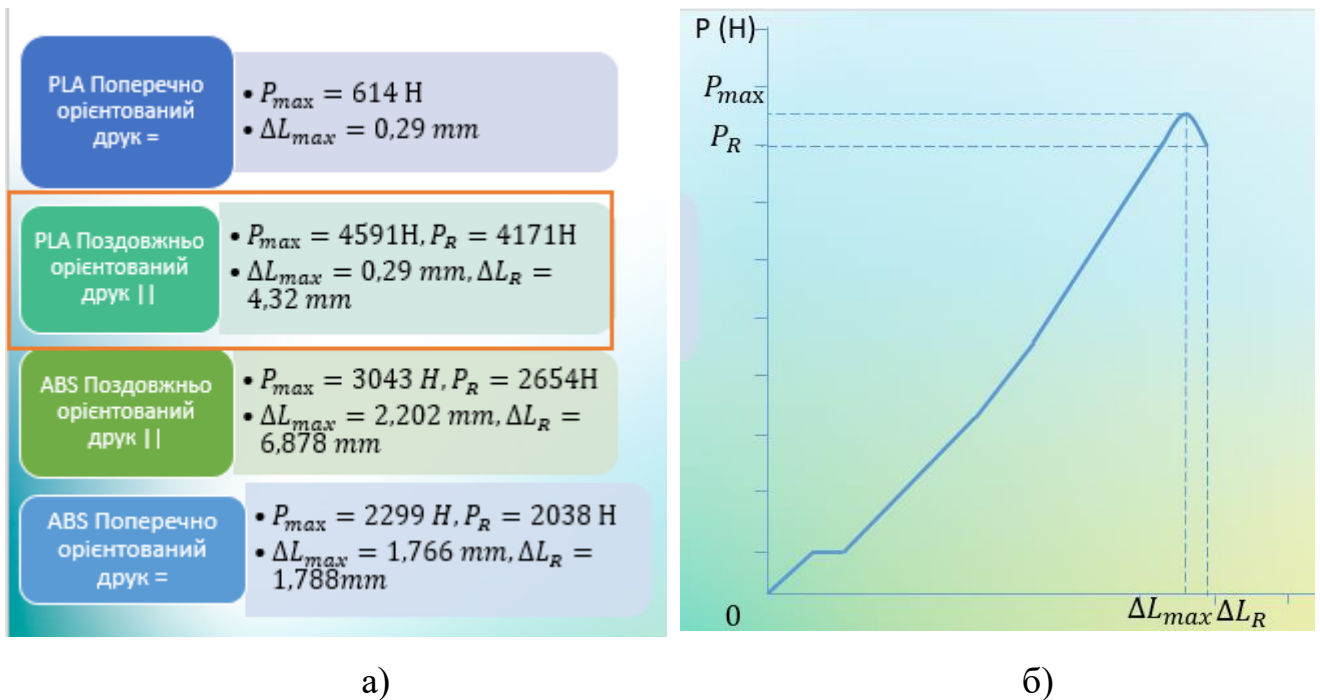


Рис. 4.16. Результати випробувань зразків прямокутної форми з різних матеріалів та різною орієнтацією друку – а, діаграма напружено-деформованого стану пластику – б.

Таким чином, взявши за основу отримані величини для ПЛА пластику з поздовжньою орієнтацією друку можна розрахувати наступні важливі механічні величини[26]:

Межа міцності при розтягу:

$$\sigma_M = \frac{P_{max}}{F} = \frac{4591}{4,13 \cdot 20,23} = 54,9 \text{ MPa} \quad (4.6)$$

Відносне видовження:

$$\varepsilon_M = \frac{\Delta L_{max}}{L_0} \cdot 100\% = \frac{2,16}{50} \cdot 100\% = 4,32\% \quad (4.7)$$

Модуль Юнга:

$$E = \frac{\sigma_M}{\varepsilon_M} \approx 1270 \text{ MPa} \quad (4.8)$$

Такі характеристики дають практично усі передумови для аналізу деталей за допомогою Методу кінцевих елементів. Крім того обраний ПЛА пластик має

певний ряд переваг над АБС, а саме його екологічність, підвищена адгезія та економічні переваги в обробці.

## **РОЗДІЛ 5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ. РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ПО ВІДРОДЖЕННЮ У ВИРОБНИЦТВО І НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС**

### **5.1. Постановка лабораторної роботи з дисципліні «Технологічне обладнання з паралельною кінематикою» і методика проведення**

На основі виконаного проекту, було вирішено створити лабораторну роботу (ЛР) з дисципліні «Технологічне обладнання з паралельною кінематикою» і методика проведення. Назва роботи «Дослідження приводів руху 3D-принтера на основі паралельної кінематики».

Протокол ЛР наведений у додатку В цього дипломного проекту.

В ході ЛР «Дослідження приводів руху 3D-принтера на основі паралельної кінематики» студенту необхідно:

1. Ознайомитися з конструктивними особливостями 3D-принтера на основі триглайду, як приклад використання ТО з МПК,
2. Виділити головні кінематичні ланцюги та проаналізувати кінематичну схему
3. Відповідно до варіанту завдання ЛР, ввести у середовищі Mathcad вхідні дані у першому рядку. (Геометричні розміри ланок механізму)
4. Відповідно до варіанту ЛР, задати траєкторію руху 3D-принтера в площині X-Y у параметричному вигляді через змінну FRAME
5. Побудувати графік траєкторії
6. Створити анімацію руху платформи 3D-принтера за заданою траєкторією. (програмний блок створення анімованої схеми через змінну FRAME студенту надається).
7. Побудувати графіки руху, швидкостей та прискорень кареток за заданою траєкторією Платформи (математична модель оберненої задачі кінематики студенту надається).
8. Зробити висновки.

Дана лабораторна робота дозволить студенту оцінити кінематичні особливості ТО з МПС та набути навичок з аналізу такого обладнання за допомогою САПР Mathcad.

## 5.2 Вартісна оцінка виготовлення дослідного зразка 3D-принтера

Оцінку собівартості виготовлення дослідного зразку 3D-принтера на основі триглайду поелементно наведено табл. 5.1

Таблиця 5.1

### Оцінка вартості модулів

№п/п	Назва	Орієнтовна ціна станом на 01.06.2017	Кількість	Примітка
1	Профіль верстатний 20*20	98 грн/м.п – з анодованим покриттям 79 грн –без покриття	3*460 мм 6*240 (460 грн)	Порізка 50 грн.
2	Головка екструдера	230 грн	1	
3	Платформа для готовки екструдер	230 грн	1	
4	Платформа+головка+обдув	720 грн	1	Альтернатива п.2+п.3
5	Екструдер	210 грн	1	
6	З'єднувачі несучої системи	320 грн	1	
7	Крокові двигуни Nema 17 1,8А	330 грн/шт (4 шт -1320 грн)	1	

8	Датчики кінцевого руху	10 грн/шт	4 шт (40 грн)	
9	Зубчастий ремінь	275 грн/10 м	1	
10	Шків	20грн/шт.	3 (60 грн)	
11	Подшипники F623ZZ	180 грн/ 20 шт		
12	Модуль лінійних напрямних	Напрявні HIWIN MGN 12H ( оригінал) (2500 грн –шт.)	3 (7500 грн)	
13		Рельсові напрямні (Китай) 600 грн.	3 (1800 грн)	
14	Система керування (плата, драйвер)	1000 грн	1	
15.	Блок живлення	500 грн	1	
16	Штанги постійної дожини 3 шарнірами	400 грн	1	
17	Комплект метизу	700 грн	1	
18	Стіл з нагрівом	280 грн	1	
19	PLA- пластик	700 грн.	1 кг	

20	Доповнення (охолодження, проводка, розхідний матеріал	500		
----	---	-----	--	--

Таким чином загальна собівартість зразку може коливатися в межах від 9000 грн до 15000 грн, в залежності від вибору виробника деяких модулів. Найпринциповіше впливає на собівартість вибір системи лінійного переміщення. Собівартість дослідного зразка 3D-принтера на основі триглайду, що представлений у даному проекті складає 11000 грн. В майбутніх дослідженнях буде проведений розрахунок собівартості години роботи 3D-принтера в різних режимах.

### 5.3. Представлення фрагментів роботи на промисловій виставці у м. Ганновері (Німеччина)

У березні 2018 року було створено відео, на якому автор цієї дисертації у дрібницях представив проект по створенню та аналізу 3D-принтера на основі триглайду. Ідея такого заходу полягала в тому, аби знайти підприємства, яким цікаві подібні розробки та вони готови інвестувати у розвиток цієї сфери.

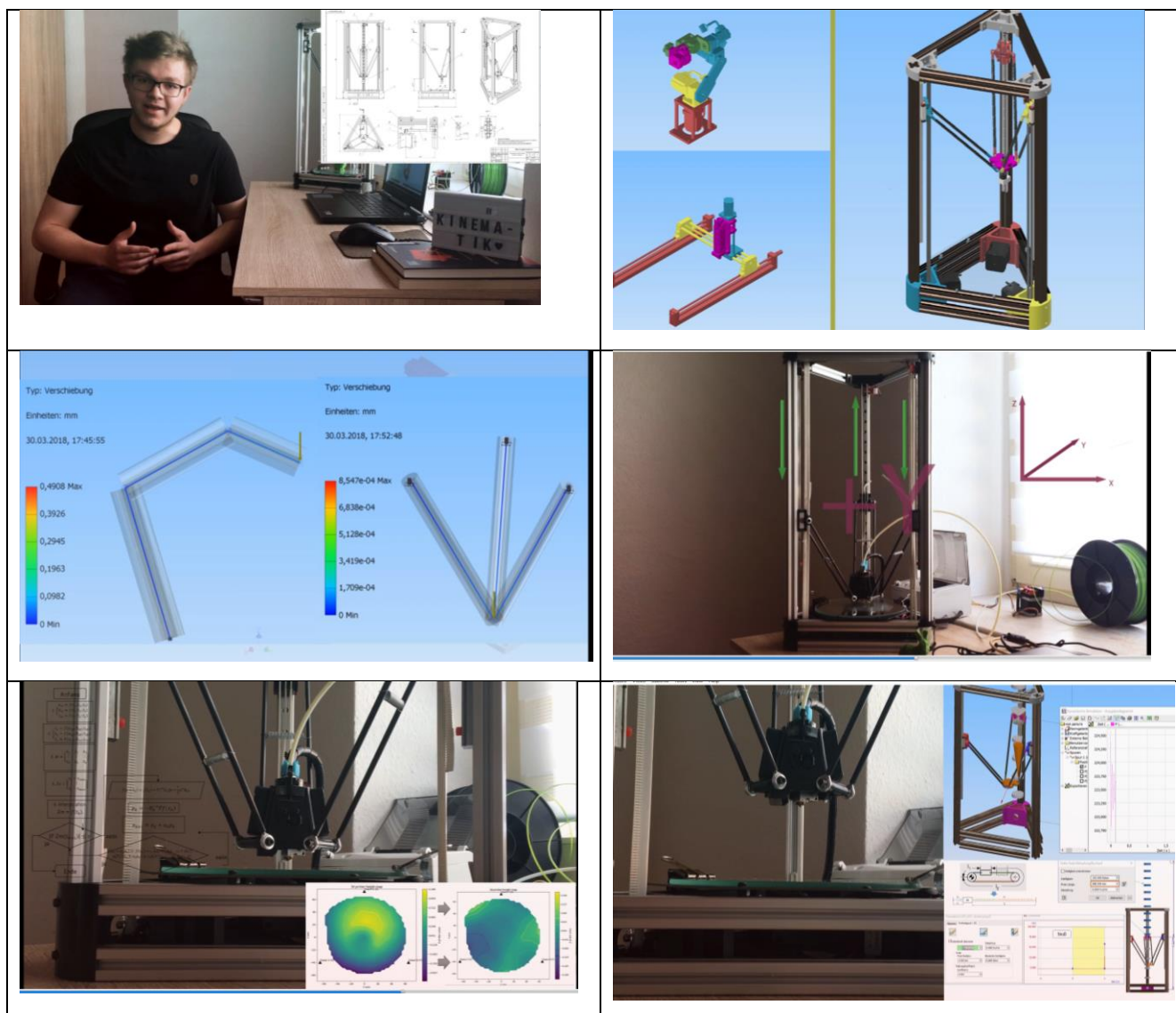


Рис. 5.1. Фрагменти відео, представленого на Ганноверській ярмарці 2018

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В ході виконання магістерської дисертації був розроблений верстат на основі 3D-принтера для трьохвимірного вирощування деталей із PLA пластику для умов дрібносерійного виробництва. Результати розробок були застосовані у навчальному процесі кафедри КВМ КПІ ім. Ігоря Сікорського.

В проєкті був наведений аналіз технічних рішень, що застосовуються в світовій практиці для створення верстатів, в яких використовується принцип 3D-принтера для пошарового та построкового формоутворення поверхонь деталей складної геометрії як з площинними поверхнями так і поверхнями криволінійними .

На підставі цього була обрана компоновка верстата на основі триглайду та обрані форми та розміри деталей (модулів, складових) із застосуванням багаторівневого морфологічного аналізу.

Розроблений робочий проєкт верстата, виготовлені модулі та їх складові, та здійснено виготовлення дослідних зразків деталей з пластмас різної конфігурації та розмірів.

Встановлені математичні залежності розрахунку позиціювання ВО для комп'ютерного керування 3D-принтером на основі триглайду. В процесі проєктування верстата, застосовані алгоритми для його автокалібрування.

Запропоновані способи регульованого усунення зазорів в рухомих з'єднаннях верстата.

Розроблено математичний апарат для врахування динамічних навантажень у системі верстата та робочих процесів в модулях верстата.

Вдосконалена параметрична модель верстата для процесу автоматичної оптимізації

Здійснені дослідження міцнісних характеристик матеріалу для 3D-друку з метою застосування обраних результатів для прогнозування технологічного процесу.



Розвиток цієї роботи може бути продовжений в дисертації на здобуття наукового ступеню «Доктор філософії».

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Аверьянов О.И. Модульный принцип построения станков с ЧПК / О.И. Аверьянов . – М.: Машиностроение, 1987.– 232с.
2. Агрегатно-модульне технологічне обладнання. Ч.1 / [Під ред. Ю.М. Кузнєцова] – Кіровоград: Імекс ЛТД, 2004. – 442 с.
3. Агрегатно-модульне технологічне обладнання. Ч.2 / [Під ред. Ю.М. Кузнєцова] – Кіровоград: Імекс ЛТД, 2004. – 286 с.
4. Альтшуллер Г.С. Найти идею. Введение в теорию изобретательских задач. – Новосибирск: Наука, 1986. – 209 с.
5. Афонин В.Л. Обработка оборудования на основе механизмов параллельной структуры / [Под общ. ред. В.Л. Афонина] В.Л.Афонин, П.В.Подзоров, В.В.Слепцов. – М.: Издательство МГТУ Станкин, Янус–К., 2006. – 452 с.
6. Зленко М.А. Аддитивні технології в машиностроєнні: посібник для інженерів /М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. -М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220с.
7. Кинематика, динамика и точность механизмов: справочник; подряд, д.т.н. Г.В.Крейнина. – М.: Машиностроение, 1984-224 с.
8. Кудинов В.А. Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.
9. Кузнєцов Ю.М. Сучасний стан, перспективи розвитку і виробництва металорізальних верстатів в Україні // Вісті Академії інженерних наук України. – 2011. №1.-с. 2-10.
10. Крижанівський В. А., Кузнєцов Ю. М., Валявський І. А., Склярів Р. А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: Під ред. Ю. М. Кузнєцова. — Кіровоград, 2004. — 449с.
11. Кузнєцов Ю.М. Теорія розв'язання творчих задач. –К.: ТОВ «ЗМОК»-ПП «ГНОЗІС», 2003. – 294 с.
12. Кузнєцов Ю.Н., Новоселов Ю.К., Луцив Н.В. Теория технических систем. – Севастополь: узд-во СевНТУ, 2010. –252 с.
13. Кузнєцов Ю.М. Світові тенденції розвитку верстатобудування II Зб. Наукових праць за матеріалами науково-методичної конференції «Вища освіта – 2006». – К.: НПУ ім.Драгоманова, 2007. – с.45 – 55.
14. Кузнєцов Ю.М. Учебно-исследовательская лаборатория малогабаритных станков с компьютерным управлением на модульном принципе // Науковий журнал «Технічні науки та технології», №1(3), Чернігів, 2016. – с.15-24.
15. Кузнєцов Ю.М., Дмитрієв Д.О., Фіранський В.Б., Степаненко О.О. Реалізація концепції каркасних компоновок верстатів з механізмами паралельної структури // Наукові вісті НТУУ «КПІ»; №1, 2012 с. 104 – 111.

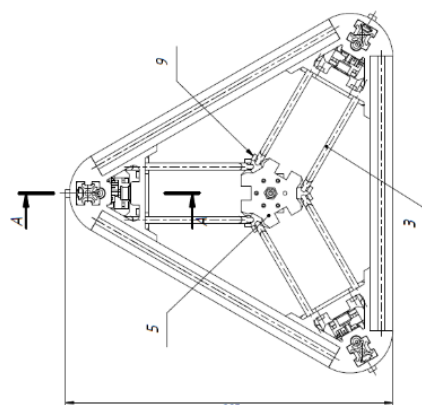
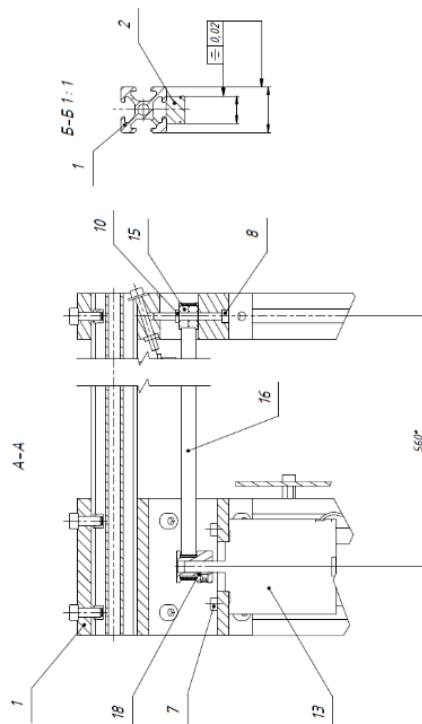
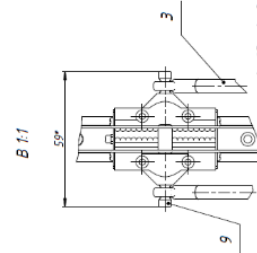
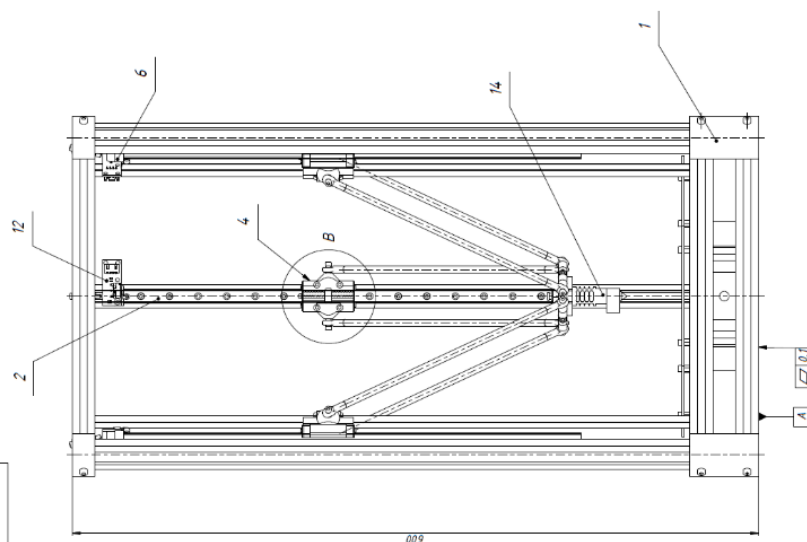
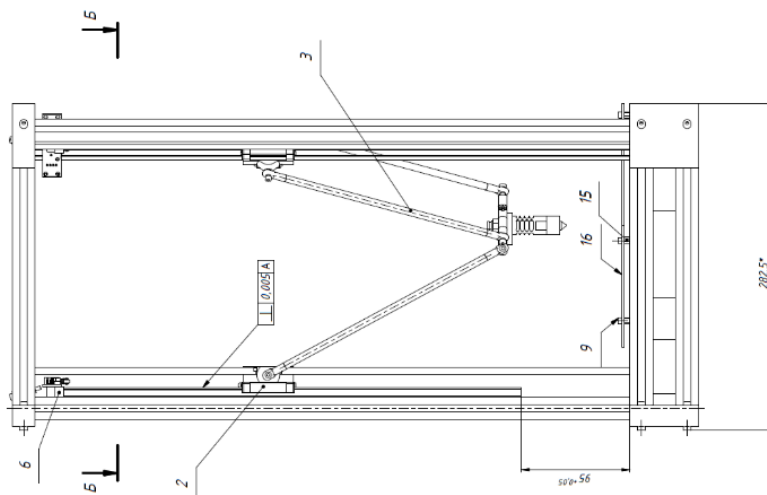
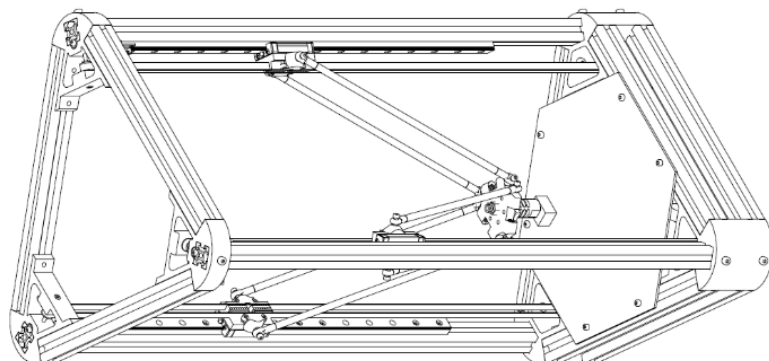
16. Кузнецов Ю.Н. Пирамидальные каркасные компоновки станков с параллельной кинематикой на модульном принципе. / Ю.Н. Кузнецов, Г.Е. Деневич, Д.А. Дмитриев, В.Б. Фиранский // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник праць. – Краматорськ, вип. №24, 2009. – 348 с. С.126-132
17. Кузнецов Ю.Н. Компьютерное моделирование и визуализация движений исполнительных органов станков с параллельной кинематикой / Ю.Н. Кузнецов, Д.А. Дмитриев // Тр. между-народной конференции “Интеллектуальный анализ информации ИАИ-2008”, КПИ, Киев. – 2008. – С. 265-276.
18. Кузнецов Ю.М. Будущее станкостроения – сердцевина машиностроения // Вестник Белорусско – Российского университета, №2(55), 2017. – с.25-35
19. Кузнецов Ю.М. Компоновки верстатів з механізмами паралельної структури / [Під ред. Ю.М. Кузнецова] Ю.М.Кузнецов, Д.О.Дмитрієв, Г.Ю.Діневич. – Херсон: ПП Вишемирський В.С., 2009. – 456 с.
20. Кузнецов Ю.Н. Вызовы четвертой промышленной революции «Индустрия 4.0» перед учеными Украины // Вестник ХНТУ, 2017., №2(61). – с. 67-75.
21. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления. Монография. Под ред. Л.Л. Таважнянского, А.И. Грабченко. – Харьков: ОАО «Модель вселенной», 2002. – 140с.
22. Мазеин П.Г. Программно-технические комплексы и технологии для подготовки машиностроителей / П.Г. Мазеин, С.С. Панов // VI Международная н/т конф. «Стратегия человечества в промышленности и образовании» (4-11 июня 2010 г., Варна, Болгария, Технический университет). – Варна. 2010. Т2, ч.1. – с. 45-50.
23. Мазеин П.Г., Савельев А.А. Использование инновационного потенциала университета в области информационных технологий для развития средств подготовки машиностроителей. Материалы открытой Всероссийской конференции «Преподавание Информационных технологий в России», 18 – 19.05.2009. Челябинск, ЮУрГУ.
24. Орликов М.Л. Динамика станков. 2-е изд., перераб. и док. – К.: Вища школа. Головне в-во, 1989. – 272 с.
25. Солнцев О.В., Дем'яненко А.С. Підвищення точності позиціонування виконавчого органу маніпулятора шляхом автоматизованої корекції кутів повороту приводів // Тези доповідей загальноуніверситетської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів, присвяченої дню Науки та 90-річчю з дня народження Володимира Олександровича Федорця. Секція "Машинобудування". Київ: НТУУ "КПІ", 2015.
26. Solntsev O., Demyanenko A. Die Industrieroboter // Іноземні мови у вирі євроінтеграції: розвиток, вивчення, переклад: Матеріали Всеукраїнської студентської науково-практичної конференції. Київ: НТУУ "КПІ", 2015.
27. Солнцев О.В., Дем'яненко А.С. Реалізація алгоритмів ПІД-Регулювання при управлінні приводами маніпуляторів в середовищі LabView // Матеріали

- Всеукраїнської науково – практичної конференції "Сучасні технології промислового комплексу", випуск 2. Херсон: ХНТУ (факультет машинобудування), 2015.
28. Солнцев О.В., Рашевський М.Ю., Дем'яненко Є.С., Кузнецов Ю.М. Передумови вибору пошукової концепції для створення технічної системи "Біонічний маніпулятор" // Тези доповідей всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів "ІННОВАЦІЇ МОЛОДІ - МАШИНОБУДУВАННЮ" секція "Конструювання верстатів та машин". Київ: НТУУ "КПІ", 2016.
  29. Солнцев О.В., Рашевський М.Ю., Дем'яненко Є.С., Кузнецов Ю.М. Вибір пошукової концепції для створення мехатронної системи «Біонічний маніпулятор // Збірка матеріалів Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню», секція "Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка". Київ: НТУУ "КПІ", 2016.
  30. Солнцев О.В., Рашевський М.Ю., Дем'яненко Є.С., Кузнецов Ю.М. Патентно-інформаційні дослідження і системно-морфологічний підхід до створення біоманіпуляторакінцівки руки людини // Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 17–18 листоп. 2016.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. – Тернопіль : ТНТУ, 2016. – 342.
  31. Солнцев О.В., Кузнецов Ю.М. Створення 3D-принтера на базі триглайда з використанням методу морфологічного аналізу // збірник тез наукових доповідей II Всеукраїнської інтернет-конференції м. Сєверодонецьк, 27-28 квітня 2017 р. – Сєверодонецьк: вид-во Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2017. – 172 с.
  32. Сопротивление материалов. / Под. общ. ред. Г.С. Писаренко. – К.: Вища школа. – 1971.–672с.
  33. Спыну Г.А. Роботы с искусственным интеллектом. – К.: Техника,1989. – 111с.
  34. Суслов А.Г., Бушуев В.В., Гречишников В.А., Смоленцев В.П. Энциклопедия. Технологи России (машиностроение). Т.1.Технология машиностроения, станки и инструменты. Под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.:Машиностроение – 1,2006. – 412с.
  35. Хамуйела Ж.А. Герра. Генетико- морфологический синтез зажимных патронов: монография / Ж.А. Герра Хамуйела, Ю.Н.Кузнецов, Т.О.Хамуйела; под ред. ,Ю.Н.Кузнецова. – Луцк: Вежа-Друк, 2017. – 328 с.
  36. Шинкаренко В.Ф. Генетическое предвидение как системная основа в стратегии управления инновационным развитием технических систем. Праці Таврійського державного агротехнічного університету. Вип. 11, том 4, 2011. с. 3-19.
  37. Charles Bell. 3D-Printing with Delta Printers – Apress, 2015

38. Evheniia Demianenko, Mykyta Rashevskyi, Oleksii Solntsev, Selection of search concept for creating a ts “bionic arm” // Innovations in Science and Technology : the XVII All-Ukrainian R&D Students Conference Proceeding, (Kyiv, November 22, 2016) / National Technical University of Ukraine Igor Sikorsy Kyiv Polytechnic Institute’. – Part I. – Kyiv, 2016. – 224 p.
39. Nocedal, George; Wright, Stephen J. Numerical Optimization. — 2nd edition. — USA: Springer, 2006. — ISBN 978-0-387-30303-1
40. Avriel, Mordecai. Nonlinear Programming: Analysis and Methods. — Dover Publishing, 2003. — ISBN 0-486-43227-0
41. НПАОП 0.00-1.28-10 «Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислюваних машин»

## ДОДАТКИ

## Додаток А. Робоча конструкторська документація



- Розміри для довідок.  
Забезпечити плавність, руху картотек та пораміщення платформ.  
Без заміркання по всім довідкам напрямків 2  
Місце з'їзду, мета, лівих відомих деталей та паролів  
підписний записник настільний лінійний ГОСТ 2150-75

[illegible]

MB71MH.DT5210.000 CK

Mali, M <sup>a</sup> roditel.	Roditi u državi	Dobro, usređeno	Mali, M <sup>a</sup> dijete	Roditi u državi

## Додаток Б. Протокол лабораторної роботи «Дослідження приводів руху 3D-принтера на основі паралельної кінематики»

### Лабораторна робота №5

Дослідження приводів руху 3-D принтера на основі паралельної кінематики

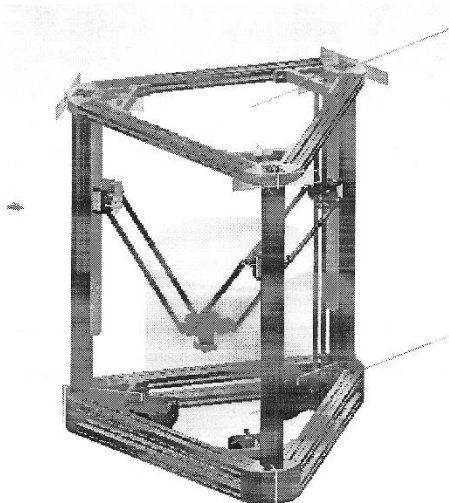


Рисунок 1 3-D принтера на основі паралельної кінематики

Вхідні дані моделі задаються в першому рядку MathCAD документу.

$$R0 := 400 \quad t_{z0} := 105 \quad r0 := 100 \quad L := 1.2 R0 \quad Bv := 40 \quad t0 := 0$$

Задана траєкторія задається в рядках:

$$tx := 150 \cdot \sin\left(\text{FRAME} \cdot \frac{\pi}{25}\right) \quad ty := 90 \cdot \sin\left(\text{FRAME} \cdot \frac{\pi}{15}\right)$$

В прикладі реалізована траєкторія

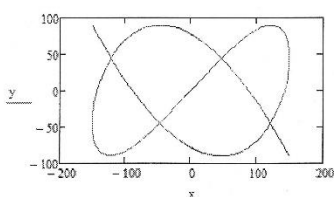


Рисунок 2 Приклад заданої траєкторії переміщення

Рух механізму моделюється на схемі (рис. 3)

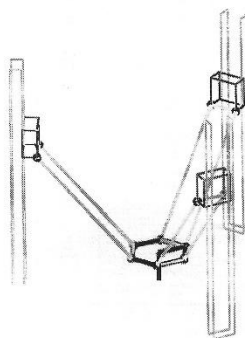


Рисунок 3 Моделювання руху механізму

Результатом моделювання є отримання залежностей переміщення, швидкості переміщення та прискорення кожної каретки приводів (рис. 4).

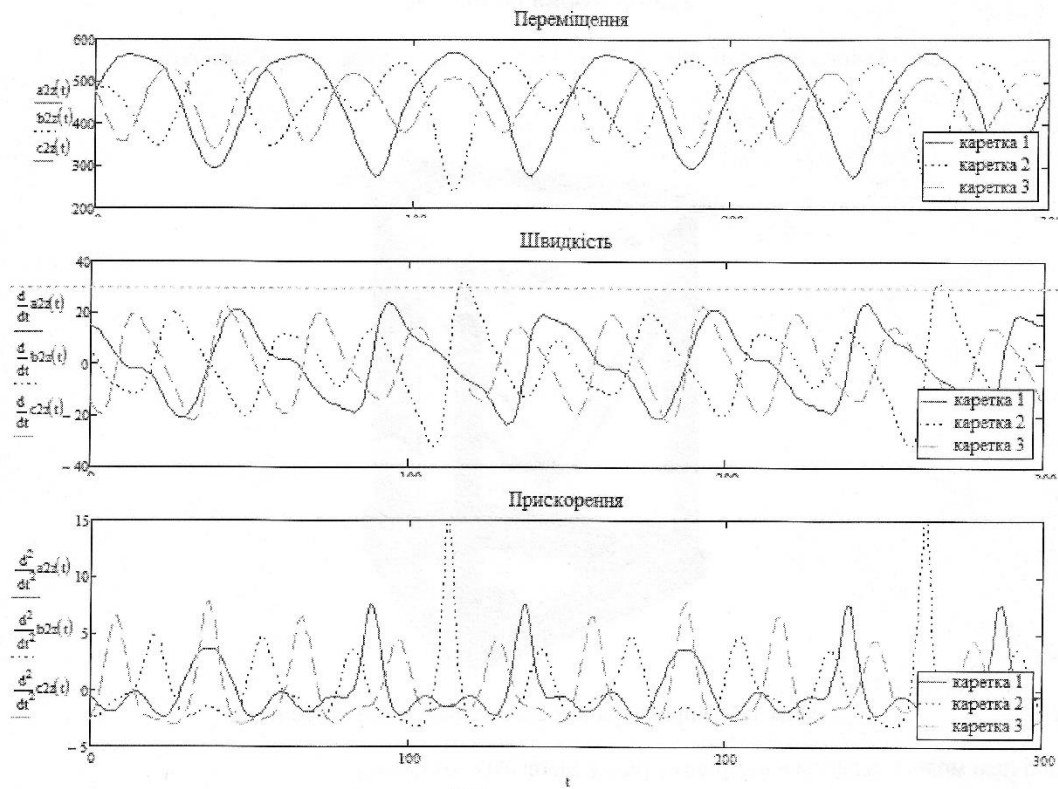


Рисунок 4 Параметри руху кареток

Виконати моделювання траєкторій у відповідності до варіанту

## Варіанти завдань

Варіант 1	$x_1 = 150 \sin\left(t \frac{\pi}{25}\right) \quad y_1 = 90 \sin\left(t \frac{\pi}{15}\right)$	Варіант 2	$x_1 = 120 \sin\left(t \frac{\pi}{25}\right) \quad y_1 = 190 \sin\left(t \frac{\pi}{35}\right)$	Варіант 3	$x_1 = 120 \sin\left(t \frac{\pi}{25}\right) \quad y_1 = 50 \sin\left(t \frac{\pi}{10}\right)$
Варіант 4	$x_1 = 120 \sin\left(t \frac{\pi}{25}\right) \quad y_1 = 50 \cos\left(t \frac{\pi}{100}\right)$	Варіант 5	$x_1 = 120 \sin\left(t \frac{\pi}{25}\right) \quad y_1 = 120 \cos\left(t \frac{\pi}{25}\right)$	Варіант 6	

Роботу виконав \_\_\_\_\_

Робота захищена \_\_\_\_\_



## Додаток С.

### Список публікацій

*Солнцева Олексія Васильовича*

станом на 20.05.2019 р.

1. Солнцев О.В. Софізми в математиці, їх класифікація, різновиди помилок та приклади // Конкурс науково-технічних проектів учнів Intel-Техно Україна 2012. Тези робіт. Частина 1. Категорія "Математичні науки". Київ: НТУУ "КПІ", 2012.
2. Солнцев О.В., Алексик І.І, Дем'яненко А.С. Розробка системи керування приводами в середовищі LabView // Тези доповідей загальноуніверситетської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів, присвяченої дню Науки. Секція "Машинобудування". Київ: НТУУ "КПІ", 2014.
3. Солнцев О.В., Дем'яненко А.С. Підвищення точності позиціонування виконавчого органу маніпулятора шляхом автоматизованої корекції кутів повороту приводів // Тези доповідей загальноуніверситетської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів, присвяченої дню Науки та 90-річчю з дня народження Володимира Олександровича Федорця. Секція "Машинобудування". Київ: НТУУ "КПІ", 2015.
4. Solntsev O., Demyanenko A. Die Industrieroboter // Іноземні мови у вирі євроінтеграції: розвиток, вивчення, переклад: Матеріали Всеукраїнської студентської науково-практичної конференції. Київ: НТУУ "КПІ", 2015.
5. Солнцев О.В., Дем'яненко А.С. Реалізація алгоритмів ПІД-Регулювання при управлінні приводами маніпуляторів в середовищі LabView // Матеріали Всеукраїнської науково – практичної конференції "Сучасні технології промислового комплексу", випуск 2. Херсон: ХНТУ (факультет машинобудування), 2015.
6. Ільчук О. С., Солнцев О. В. Обґрунтування раціональності імплементації Директиви 2009/104/ЄС в дійсне законодавство України // Проблеми охорони праці, промислової та цивільної безпеки: Збірник матеріалів Тринадцятої Всеукраїнської науково-методичної конференції (з участю студентів). Київ: НТУУ —КПІ, 2015.
7. Кузнєцов Ю.М., Солнцев О.В. Передумови автоматизованого проектування технічної системи "Біонічний маніпулятор" // Матеріали V-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених "Прикладна геометрія, дизайн, об'єкти інтелектуальної власності та інноваційна діяльність студентів та молодих вчених". Випуск 5. Київ: ДІА, 2016.

8. Солнцев О.В., Яхно А.С., Мітусов М.С., Стадник В.А. Стенд для випробування зубчастих коліс за замкнутим силовим контуром // Тези доповідей всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів "ІННОВАЦІЇ МОЛОДІ - МАШИНОБУДУВАННЮ" секція "Конструювання верстатів та машин". Київ: НТУУ "КПІ", 2016.
9. Солнцев О.В., Рашевський М.Ю., Дем'яненко Є.С., Кузнецов Ю.М. Передумови вибору пошукової концепції для створення технічної системи "Біонічний маніпулятор" // Тези доповідей всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів "ІННОВАЦІЇ МОЛОДІ - МАШИНОБУДУВАННЮ" секція "Конструювання верстатів та машин". Київ: НТУУ "КПІ", 2016.
10. Солнцев О.В., Рашевський М.Ю., Дем'яненко Є.С., Кузнецов Ю.М. Вибір пошукової концепції для створення мехатронної системи «Біонічний маніпулятор» // Збірка матеріалів Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню», секція "Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка". Київ: НТУУ "КПІ", 2016.
11. Солнцев О.В., Рашевський М.Ю., Дем'яненко Є.С., Кузнецов Ю.М. Патентно-інформаційні дослідження і системно-морфологічний підхід до створення біоманіпуляторакінцівки руки людини // Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 17–18 листоп. 2016.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. – Тернопіль : ТНТУ, 2016. – 342.
12. Evheniia Demianenko, Mykyta Rashevskyi, Oleksii Solntsev, Selection of search concept for creating a ts “bionic arm” // Innovations in Science and Technology : the XVII All-Ukrainian R&D Students Conference Proceeding, (Kyiv, November 22, 2016) / National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. – Part I. – Kyiv, 2016. – 224 p.
13. Солнцев О.В., Кузнецов Ю.М. Створення 3D-принтера на базі триглайда з використанням методу морфологічного аналізу // збірник тез наукових доповідей II Всеукраїнської інтернет-конференції м. Сєверодонецьк, 27-28 квітня 2017 р. – Сєверодонецьк: вид-во Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2017. – 172 с.
14. Солнцев А.В., Кузнецов Ю.Н. Теоретические исследования 3D-принтера на базе триглайда // Современные проблемы машиноведения : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 22–23 нояб. 2018 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Фил. ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого» ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – 404 с.

## Liste der Publikationen von Solntsev Oleksii

nach dem Stand vom 27.04.2016

1. Solntsev O. Sufismus in der Mathematik, deren Klassifizierung, Fehlertypen und Beispiele // Wettbewerb von wissenschaftlich technischen Projekten von Schülern Intel-Techno Ukraine 2012. Thesen. Teil 1. Kategorie "Mathematische Wissenschaften". Kiew: NTUU "KPI", 2012.
2. Solntsev O., Aleksyk I., Demjanenko A. Entwicklung vom Antriebssystem in LabView-Umgebung // Berichtsthesen von gesamtukrainischen wissenschaft-technischen Konferenz von jungen Wissenschaftlern und Studenten, gewidmet dem Tag der Wissenschaft. Sektion "Maschinenbau". Kiew: NTUU "KPI", 2014.
3. Solntsev O., Demjanenko A. Die Verbesserung der Genauigkeit der Positionierung des Exekutivorgans vom Manipulator durch die automatische Korrektur des Drehwinkelantriebes // Berichtsthesen von gesamtukrainischen wissenschaft-technischen Konferenz von jungen Wissenschaftlern und Studenten, gewidmet dem Tag der Wissenschaft und dem 90-Geburtstag von Wolodamyr Oleksandrowytsch Fedorez, gewidmet dem Tag der Wissenschaft, Kiew: NTUU "KPI", 2015.
4. Solntsev O., Demyanenko A. Die Industrieroboter // Fremdsprachen im Integrationswirbel: Entwicklung, Erlernen, Übersetzung: Stoffen von allukrainischen studentlichen wissenschaft-technischen Konferenz. Kiew: NTUU "KPI", 2015.
5. Solntsev O., Demyanenko A. Die Umsetzung der PID-Optimierungsalgorithmen in der Verwaltung von Manipulationsantriebe in einer Umgebung von LabView // Stoffen von allukrainischen wissenschaft-praktischen Konferenz " Moderne Technologien der industriellen Komplex ", Ausgabe 2. Cherson: HNTU (Fakultät für Maschinenbau), 2015.
6. Iltschuk O., Solntsev O. Begründung der rationalen Umsetzung der Richtlinie 2009/104 / EG in der gültigen Gesetzgebung der Ukraine // Arbeitsschutzprobleme, Betriebs und Zivilsicherheit: Materialsammlung von Dreizehnten von allukrainischen wissenschaft-praktischen Konferenz Збірник матеріалів (mit Studententeilnahme). Kiew: NTUU —KPI, 2015.
7. Kusnezow J., Solntsev O. Voraussetzungen von automatisierte Projektierung des technischen Systems "Bionischer Manipulator"// Materialien von V-gesamtukrainischen wissenschaft-praktischen Konferenz von Studenten, Aspiranten und jungen Wissenschaftlern "Angewandte Geomerie, Design, Objekte des geistigen Eigentums und innovative Tätigkeit von Studenten und jungen Wissenschaftlern". Ausgabe 5. Kiew: DIJ, 2016.
8. Solntsev O., Jachno A., Mitusow M., Stadnyk W. Ständer für die Prüfung von Zahnräder für geschlossenen Kraftkontur // Berichtsthesen von

gesamtukrainischen wissenschaft-technischen Konferenz von jungen Wissenschaftlern und Studenten "INNOVATIONEN VON JUGENDLICHE - MASCHINENBAU" Sektion "Aufbau von Werkzeugmaschinen und Maschinen". Kiew: NTUU "KPI", 2016.

9. Solntsev O., Raschewskyj M., Demjanemko E., Kusnezow J. Voraussetzungen der Suchkonzeptionsauswahl für Erstellung des technischen Systems "Bionischer Manipulator" // Berichtsthesen von gesamtukrainischen wissenschaft-technischen Konferenz von jungen Wissenschaftlern und Studenten "INNOVATIONEN VON JUGENDLICHE - MASCHINENBAU" Sektion "Aufbau von Werkzeugmaschinen und Maschinen". Kiew: NTUU "KPI", 2016.
10. Solntsev O., Raschewskyj M., Demjanemko E., Kusnezow J. Die Auswahl von Suchkonzeption für die Erstellung vom mechatronischen System «Bionischer Manipulator» // die Materialsammlung von gesamtukrainischen wissenschaft-technischen Konferenz von jungen Wissenschaftlern und Studenten «Innovationen von Jugendliche - Maschinenbau», Sektion "Angewandte Hydroaerodynamik und Mechatronik". Kiew: NTUU "KPI", 2016.
11. Solntsev O., Raschewskyj M., Demjanemko E., Kusnezow J. Patent information research and system-morphological approach to robot limbs of the human hand. Actual problems of modern technologies : book of abstracts of the IV International scientific and technical conference of young researchers and students, (Ternopil, 17th-18th of November 2016.) / Ministry of Education and Science of Ukraine, Ternopil Ivan Puluj National Technical Universtiy [and other.]. – Ternopil : TNTU, 2016. – 432.
12. Evheniia Demianenko, Mykyta Rashevskyi, Oleksii Solntsev, Selection of search concept for creating a ts “bionic arm” // Innovations in Science and Technology : the XVII All-Ukrainian R&D Students Conference Proceeding, (Kyiv, November 22, 2016) / National Technical University of Ukraine Igor Sikorsy Kyiv Polytechnic Institute‘. – Part I. – Kyiv, 2016. – 224.
13. Solntsev O., Kusnezow J. Die Entwicklung von 3D-Drucker auf Basis von Triglayd durch morphologische Analyse-Verfahren // die Materialsammlung von II gesamtukrainischen wissenschaft-technischen Internet-Konferenz, Severodonetsk, 27-28 April. – Severodonetsk: East Ukrainian National University of Vladimir Dal, 2017. – 172 c.